



На правах рукописи

ДРУЖИНИН Алексей Анатольевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ
ГИДРОАГРЕГАТОВ МИКРОГЭС НА НАПОРЫ ДО 2 М ДЛЯ КОМБИНИРОВАННЫХ
ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ**

Специальность – 05.04.13 Гидравлические машины и гидропневмоагрегаты

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва, 2020

Работа выполнена на кафедре «Гидромеханики и гидравлических машин» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ».

Научный руководитель:

Волков Александр Викторович
доктор технических наук, заведующий
кафедрой «Гидромеханики и гидравлических
машин» ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

Официальные оппоненты:

Волшаник Валерий Валентинович
доктор технических наук, профессор
кафедры Гидравлики и гидротехнического
строительства НИУ "МГСУ"

Петров Алексей Игоревич
кандидат технических наук, доцент
кафедры Э10 "Гидромеханика, гидромашины и
гидропневмоавтоматика" ФГБОУ ВО МГТУ
им. Н.Э. Баумана

Ведущая организация:

ОАО "НПО ЦКТИ им. И.И. Ползунова"
г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится "27" ноября 2020 г. в 13:30 на заседании диссертационного совета МЭИ.018 при ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ" по адресу: 111250, г. Москва, Красноказарменная ул., д. 17, ауд. Г-300.

Отзывы на автореферат диссертации (в 2-х экземплярах, заверенные печатью учреждения) просьба направлять по адресу: 111250, г. Москва, Красноказарменная ул., д. 14, Учёный совет НИУ "МЭИ".

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИУ «МЭИ» и на сайте www.mpei.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета МЭИ.018
Доктор технических наук



А.В. Рыженков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время активно ставятся задачи комбинированного энергоснабжения потребителей с использованием экологически чистых источников энергии, к которому также относится и гидроэнергетика. Освещены пути решения проблемы неосвоенности гидроэнергетического потенциала (ГЭП) малых рек равнинных территорий Российской Федерации и европейских стран со схожим рельефом местности. На примере создания комбинированного энергетического комплекса на основе микроГЭС показана эффективность его применения для большого количества потребителей, расположенных в зонах децентрализованного энергоснабжения, которые испытывают значительный недостаток электроэнергии, либо сталкиваются с частыми перебоями в энергоснабжении. Показано, что необходимый для решения данной проблемы ГЭП крупных рек практически освоен и исчерпан, в этой связи перспективным направлением развития становится использование ГЭП малых рек.

Изложенные в работе подходы, связанные с развитием энергоснабжения энергосбережения соответствуют Приоритетам и перспективам научно-технологического развития Российской Федерации, в частности 20 разделу: б) переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, повышение эффективности добычи и глубокой переработки углеводородного сырья, формирование новых источников, способов транспортировки и хранения энергии; а также разделу 22 Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации до 2035 года – "...исследования в области понимания процессов, происходящих в обществе и природе, развития природоподобных технологий, человеко-машинных систем, управления климатом и экосистемами...".

Таким образом, проведённые в работе исследования разрешают проблему создания гидравлических турбин, способных эффективно работать в условиях низких располагаемых напоров малых равнинных рек, предоставляя возможность стабильного автономного энергоснабжения потребителей, расположенных вблизи таких водных объектов.

Цель работы заключается в разработке эффективного метода проектирования элементов проточной части низконапорных микротурбин, работающих в составе комбинированных автономных энергетических комплексов.

Объектом исследования является комбинированный энергетический комплекс на основе малой и микрогидроэнергетики, предназначенный для энергоснабжения автономных потребителей, расположенных вблизи русел рек в равнинной местности.

Основными задачами работы являются:

- Создание эффективного комбинированного комплекса на основе низконапорных (до 2 м) микроГЭС, для обеспечения автономных потребителей тепловой и электрической энергией.
- Разработка метода предварительной оценки эффективности комбинированного комплекса, учитывающего индивидуальную конфигурацию проточной части.
- Расчётно-экспериментальные исследования по определению густоты гидродинамической решётки для лопастной системы осевых гидротурбин микрокласса.
- Разработка эффективных путей совершенствования лопастных систем гидротурбин осевого типа с использованием природоподобных технологий.
- Разработка технологии изготовления рабочего колеса гидротурбины с использованием 3D-прототипирования.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработана эффективная конструктивная компоновка комбинированного энергетического комплекса на основе микроГЭС.
2. Разработан метод расчёта элементов проточной части низконапорных (до 2 м) гидроагрегатов с учётом взаимодействия "гидротурбина-водовод", обеспечивающей максимальный КПД системы.
3. На основе расчётно-экспериментальных исследований с использованием ПО «FlowVision» получены номограммы $\overline{C_x} = f(l/t)$, $\overline{C_y} = f(l/t)$ для определения эффективной плотности решетки микрогидротурбин.
4. Разработан способ применения «эффекта плавника кита» для повышения эффективности лопастных систем осевых гидротурбин.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

Работа выполнялась по планам госбюджетных научно-исследовательских работ Научного центра «Износостойкость» и кафедры Гидромеханики и гидравлических машин им. В.С. Квятковского Национального исследовательского университета «МЭИ». Разработанные методы проектирования способствовали созданию трёх экспериментальных стендов для исследования энергетических характеристик гидравлических микротурбин на базе лаборатории гидроаэромеханики НИУ «МЭИ». Экспериментальные исследования, проведённые на данных стендах использованы для детального изучения рабочего процесса гидравлической части комбинированного энергетического комплекса созданной компоновки, а также анализа и разработки рекомендаций по эффективной эксплуатации комплексов комбинированного энергоснабжения, созданных на основе микроГЭС.

Достоверность и обоснованность полученных в работе результатов определяется:

- использованием апробированных методик планирования и проведения исследований, методик анализа экспериментальных результатов, применением средств измерений необходимой точности;
- удовлетворительной сходимостью результатов исследований при многократных повторениях;
- корректным использованием апробированных пакетов, предназначенных для расчётно-теоретических исследований тепло- и гидродинамических процессов.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- заседаниях научно-технического совета Научного центра "Износостойкость" "НИУ "МЭИ", 2016 – 2020 гг.;
- заседаниях кафедры Гидромеханики и гидравлических машин им. В.С. Квятковского "НИУ "МЭИ", 2016 – 2020 гг.;
- XXIII Международной конференции по Гидроэнергетике "HydroTurbo'2016" 2016 г., г. Зноймо, Чешская Республика;
- XX Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов "Гидравлические машины, гидроприводы и гидро- пневмоавтоматика" 2016 г., г. Москва, НИУ "МЭИ";
- III Ежегодной Всероссийской научно-практической конференции «Исследования и разработки - 2016» 2016 г., г. Москва, ЦВК «Экспоцентр»;
- XXIII, XXV Международных научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» 2017, 2019 г., г. Москва, "НИУ "МЭИ";
- X, XI Международных научно-технических конференциях "Гидравлические машины, гидропневмоприводы и гидропневмоавтоматика. Современное состояние

и перспективы развития" 2018, 2020 г., г. Санкт-Петербург, ФГАОУ ВО "СПбПУ Петра Великого";

- XXIV Международной конференции по Гидроэнергетике "HydroTurbo'2018" 2018 г., г. Братислава, Словацкая Республика;
- XXVIII Международной конференции "Котлы и энергетическое оборудование-2019", 2019 г., г. Брно, Чешская Республика;
- X Международной научно-технической конференции "Разработка, производство и эксплуатация турбо-, электронасосных агрегатов и систем на их основе" ("СИНТ'19") 2019 г., г. Воронеж, АО "Турбонасос".

На защиту выносятся:

- Эффективная компоновка комбинированного комплекса на основе низконапорных (до 2 м) микроГЭС, для обеспечения автономных потребителей тепловой и электрической энергией.
- Метод предварительной оценки эффективности комбинированного комплекса, учитывающего индивидуальную конфигурацию проточной части.
- Результаты расчётно-экспериментальных исследований по определению густоты гидродинамической решётки для лопастной системы осевых гидротурбин микрокласса.
- Метод совершенствования лопастных систем гидротурбин осевого типа с использованием природоподобных технологий.
- Метод изготовления рабочего колеса гидротурбины с использованием 3D-прототипирования.

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 34 печатных трудов, из них в изданиях из перечня ВАК – 4 статьи; в журналах, рецензируемых базой данных Scopus – 11 статей; в журналах, рецензируемых базой данных РИНЦ – 8 статей; 8 докладов; 3 патента на полезную модель; 3 заявления на выдачу патента на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованных источников литературы. Работа содержит 118 страниц основного машинописного текста, 59 рисунков, 10 таблиц, библиография содержит 102 наименования.

Большую помощь в выполнении работы оказал старший научный сотрудник НЦ «Износостойкость» А.Г. Парыгин.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведено обоснование актуальности темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования.

В первой главе приведён процесс разработки схемного решения комбинированного источника энергии. В ходе проработки концепции предложена схема комбинированного энергоснабжения автономного потребителя на основе микроГЭС с встроенной турбиной осевого типа в проточную часть водовода в виде сифона (рис. 1).

Такое схемное решение позволяет обеспечить:

- устойчивую и надёжную работу в пределах суточного цикла;
- повышение манёвренности при дискретном регулировании мощности,
- использование нескольких гидроагрегатов различной мощности для аварийного резервирования,
- принцип модульности (наращивание установленной мощности в зависимости от нужд потребителя);

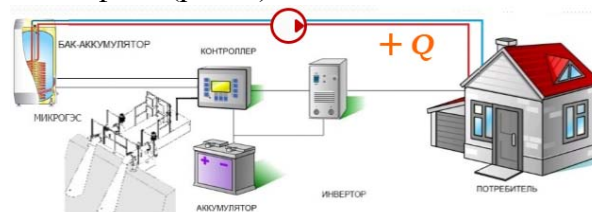


Рис. 1. Схема автономного энергоснабжения на основе микроГЭС

Выполнен анализ возможности применения различных конструктивных схем микроГЭС при его проработке, который показал, что задача по созданию комбинированного источника энергии в условиях низких напоров ($H = 2-3$ м) для рассматриваемой области гидроэнергетики значительно усложняются в связи с рядом факторов, среди которых особого внимания заслуживает проблема низкого КПД существующих типов гидромашин в области малых располагаемых напоров.

Во второй главе изложен метод предварительной оценки эффективности микрогидротурбины. Основываясь на проблеме разнообразия природно-климатических условий равнинной местности, а также отсутствии существующих типов гидромашин, способных эффективно работать в условиях малых напоров и расходов рабочей среды, показана усовершенствованная методика проектирования пропеллерной гидротурбины микроГЭС с напорным водоводом, заключающаяся в предварительной оценке энергетической эффективности микроГЭС и позволяющая оптимизировать расчётные параметры гидротурбины в её составе на ранних стадиях проектирования. Так, энергетическая эффективность гидротурбины в составе микроГЭС оценивается по коэффициенту использования энергии K_N (1):

$$K_N(h, \eta) = N_{ГТ} / N = \eta \cdot \sqrt{1 - \eta(2 - \eta)}, \quad (1)$$

где N – располагаемая мощность потока в напорном водоводе, $N_{ГТ}$ – мощность гидротурбины, η – гидравлический КПД турбины, $h = H_{ГТ} / H_p$ – коэффициент полезного использования напора, как отношение теоретического напора гидротурбины $H_{ГТ}$ к располагаемому напору водовода H_p .

Функция (1) численно характеризует долю располагаемой гидравлической энергии водовода, срабатываемую гидротурбиной, установленной в его проточной части. Максимум функции $K_N(h, \eta)$ достигается при максимальном значении $\eta = \eta_{max}$ и оптимальном значении h , соответствующем нулевому значению первой производной функции $K_N(h, \eta)$ (2):

$$h_{opt} = \frac{2}{3(2 - \eta_{max})}, \quad (2)$$

На рис. 2 представлена графическая интерпретация предела энергетической эффективности микрогидротурбин различного типоразмера ($\eta = \text{var}$):

Этот предел для гидротурбины, установленной в напорном водоводе, является гидравлическим аналогом предела Беца-Жуковского, известного в теории ветроэнергетики и позволяет оценить энергетическую эффективность гидротурбины в составе микроГЭС на ранних стадиях проектирования, а также более грамотно оптимизировать её расчётные параметры.

В третьей главе описан процесс создания лопастной системы с использованием оригинальных подходов. С целью упрощения технологии изготовления, снижения затрат при изготовлении рабочего колеса микрогидротурбины, рассмотрен процесс проектирования лопастной системы, состоящей из плоских профилей. Задача проектирования такого рабочего колеса подразумевает использование теории Н.Е. Жуковского. Особенностью применения данной теории является определение результирующей всех сил, действующих на плоский профиль лопасти, используя выражения (3), (4) для нахождения проекционных составляющих:

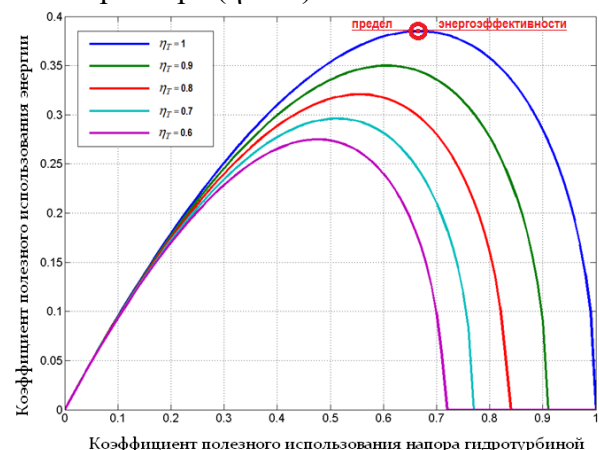


Рис. 2. Графическая иллюстрация предела энергетической эффективности

$$P_x = C_x \rho \frac{w^2}{2} l, \quad (3)$$

$$P_y = C_y \rho \frac{w^2}{2} l. \quad (4)$$

Использование данных выражений подразумевает определение коэффициентов лобового сопротивления C_x и подъёмной силы профиля C_y . Обычно, для этого используются метод Вознесенского-Пекина и соответствующие номограммы, приведенные в работах А.А. Ломакина и В.В. Барлита. Однако, данные номограммы позволяют определить только коэффициент лобового сопротивления C_x . Для дополнения недостающих данных для проектирования использовался российский расчётный ППП "FlowVision". С этой целью расчётно-экспериментальным методом были получены значения существующей номограммы $C_x=f(l/t)$ для оценки достоверности, а в последствии, по результатам успешной оценки сходимости расчётных и расчётно-экспериментальных результатов получена новая номограмма $C_y=f(l/t)$, что позволило с достаточной степенью достоверности определить параметры лопастной системы рабочего колеса.

На рис. 3 штрих-пунктирными линиями представлены известные значения номограммы $C_x=f(l/t)$, которые сопоставлены с основными линиями подтверждающих результатов расчётно-экспериментального исследования номограммы $C_x=f(l/t)$.

На рис. 4 изображены новые данные: расчётно-экспериментальным методом полученная номограмма $C_y=f(l/t)$, необходимая для дополнения входных параметров при проектировании лопастной системы.

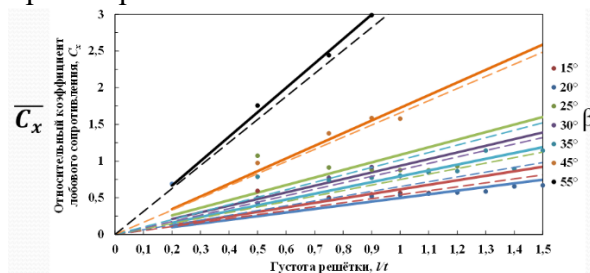


Рис. 3. Результаты верификации номограммы $C_x=f(l/t, \beta)$

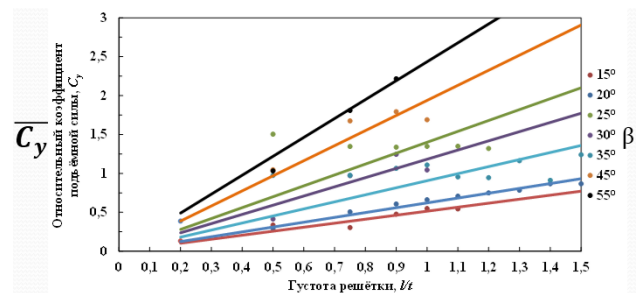


Рис. 4. Номограмма $C_y=f(l/t, \beta)$, полученная расчётно-экспериментальным методом

Показано, что результаты расчётно-теоретических исследований гидродинамической решётки плоских профилей с варьируемыми параметрами (l – длины профиля, β – угла установки лопасти, t – шага решетки) могут быть использованы с достаточной степенью достоверности для создания лопастных систем с использованием теории Н.Е. Жуковского. Результаты дополняют данные известных номограмм и дают возможность использовать гидродинамические характеристики одиночного профиля для проектирования гидродинамических решёток и корректировки в них скелетной линии профиля.

Рабочее колесо (рис. 5), созданное в новой конфигурации имеет 8 лопастей в виде плоских пластин и спроектировано на следующие расчётные параметры:

- мощность $N=25$ Вт,
- частота вращения $n=1000$ об/мин,
- расчётный напор $H_p = 0,84$ м.
- внешний диаметр рабочего колеса $D=80$ мм.

С целью и подтверждения работоспособности, гидравлической части комбинированного энергетического комплекса, создана её модель, состоящая из гидротурбины, встроенной в водовод в виде сифона и системы управления электрической машиной. Модель экспериментально апробирована с использованием гидродинамического лотка лаборатории гидроаэромеханики "НИУ "МЭИ".

Характеристика мощности $N=f(n)$, полученная по результатам экспериментальных исследований показала, что $N_{max}=18$ Вт при расчётной частоте вращения. Её внешний вид представлен на рис. 6.

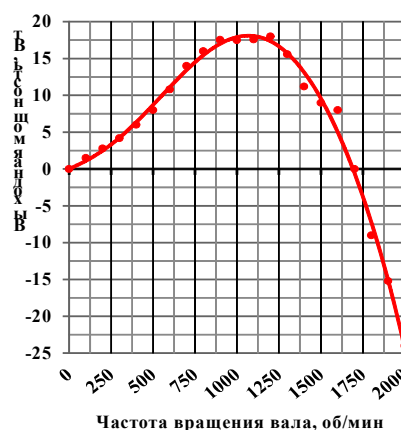


Рис. 5. Рабочее колесо, спроектированное с использованием теории Н.Е. Жуковского

Рис. 6. Экспериментальная характеристика $N=f(n)$ модели микроГЭС

Для повышения достоверности полученных результатов был создан макет гидравлической части (рис. 7) комбинированного энергетического комплекса со следующими расчётными параметрами:

- мощность $N=1500$ Вт,
- частота вращения $n=1000$ об/мин,
- расчётный напор $H_p = 2,5$ м.
- внешний диаметр рабочего колеса $D=250$ мм.

По результатам экспериментальных исследований макета, получена временная осциллограмма (рис. 8) ключевых параметров гидравлической части комплекса – мощности и частоты вращения $N, n=f(t)$. Её внешний вид показывает три основных режима работы - насосный, переходный и турбинный (основной).

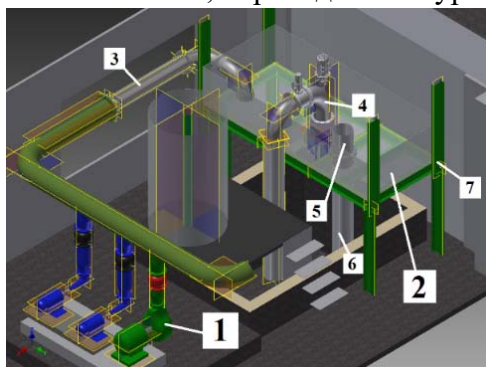


Рис. 7. 3D-модель экспериментального стенда макета гидравлической части комбинированного энергетического комплекса

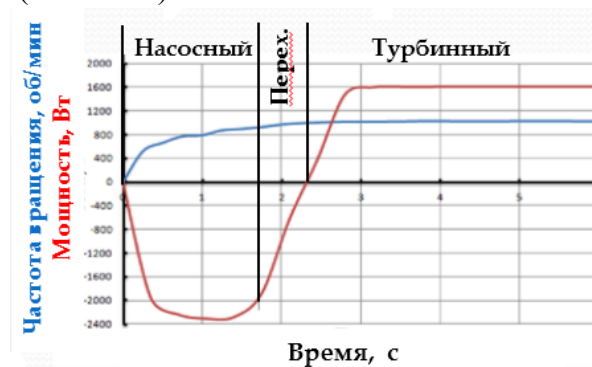


Рис. 8. Временная осциллограмма параметров гидравлической части комплекса

1 – циркуляционный насос стенда, 2 – верхний бьеф, 3 – напорный трубопровод, 4 – водовод в виде сифона с гидротурбиной и электрической машиной в сборе, 5 – переливной трубопровод, 6 – нижний бьеф.

Проведён анализ полученных результатов, который показал, что проектирование лопастной системы рабочего колеса необходимо вести на насосный режим для обеспечения гарантированного заполнения проточной части при запуске энергетического комплекса в работу.

В четвёртой главе изложен процесс совершенствования лопастной системы гидротурбины для повышения работоспособности. Созданное ранее рабочее колесо отличается высокой густотой лопастной системы, что значительно осложняет эксплуатацию микрогидротурбины в реальных условиях. Например, в паводковый период, когда высока вероятность попадания посторонних предметов в проточную часть.

С целью максимального снижения риска потери работоспособности в подобных условиях, спроектировано рабочее колесо на те же расчётные параметры, что и 8-ми лопастное, но с использованием классических подходов к проектированию микрогидротурбин. Рабочее колесо с новой лопастной системой (рис. 9), отличается меньшим количеством лопастей ($z = 3$) для существенного увеличения размеров межлопастного канала, а лопасти рабочего колеса спроектированы по трём характерным сечениям.



Рис. 9. Рабочее колесо, спроектированное с использованием классических подходов.

На рис. 10 представлены эпюры распределения давления в межлопастном канале рабочего колеса по результатам *CFD*-моделирования в ППП "FlowVision":

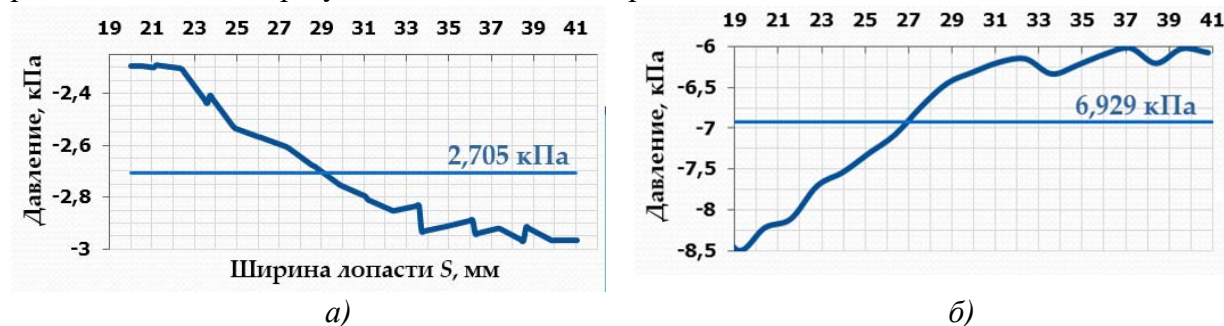


Рис. 10. Эпюры распределения давления в межлопастном канале рабочего колеса.
а - на входе, б - на выходе

По результатам анализа данных, полученных в результате построения эпюр, произведена оценка перепада давления, который на рабочем колесе составил $\Delta P = 4,2$ кПа.

Сравнительная оценка энергетических качеств микрогидротурбины с исходным и новым рабочими колёсами, полученных в результате проведения виртуальных расчётов, сведена в Таблицу 1.

Таблица 1. Сравнительные энергетические характеристики микрогидротурбины

Рабочее колесо	Мощность N , Вт	Крутящий момент $M_{кр}$, Н·м
Исходное ($z = 8$)	9,95	0,103
Новое ($z = 3$)	16,9	0,152

С целью выявления соответствия рабочего колеса типовому виду напорной характеристики, присущей осевым гидромашинам, проведены его расчётные исследования в насосном режиме. Результаты представлены на рис. 11. Полученная напорная характеристика исследуемого рабочего колеса, имеющего коэффициент быстроходности $n_s = 635$, демонстрирует привычный для осевых насосов вид.

Выполнен анализ полученных результатов, который даёт основание полагать, что энергетические характеристики микрогидротурбины достоверны и при её дальнейшем создании с учётом эксплуатационных требований, будут достигнуты показатели не хуже, чем с исходным рабочим колесом.

В пятой главе изложен оригинальный алгоритм повышения эффективности микрогидротурбины в основном режиме работы. Повышение эффективности гидравлической части комбинированного энергетического комплекса проводилось с использованием нового перспективного направления – природоподобных технологий. При этом, особое внимание уделено биологическим видам, среда обитания которых имеет близкие характеристики с областью работы гидравлических машин. Показано, что «горбатые» киты (рис. 12) используют особенности строения своих грудных плавников, имеющих морфологические наросты рядного расположения на передней кромке.

Установлено, что расположение, размер и количество наростов оказывают влияние на условия обтекания рабочих органов микрогидротурбин, связанное с улучшением гидродинамических характеристик потока в проточной части.

С целью экспериментальной апробации данного подхода, проведены расчётные и экспериментальные исследования по переносу новых положительных гидродинамических свойств «эффекта плавника кита» на рабочие органы малых и микрогидротурбин осевого типа, встроенных в водовод (рис. 13).

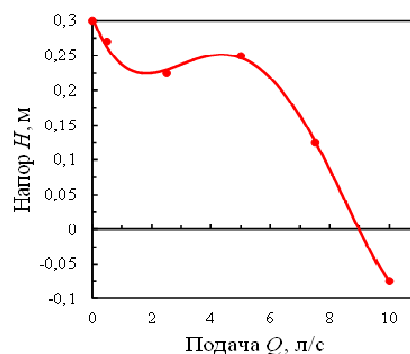


Рис. 11. Расчётная напорная характеристика, рассчитанная в насосном режиме работы



Рис. 12. Фотоснимок строения плавника горбатого кита

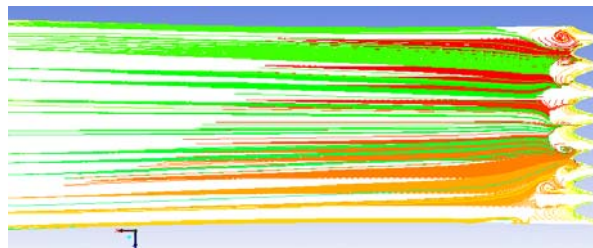


Рис. 13. Линии тока, полученные при CFD-моделировании процессов обтекания поверхностей, подобных строению плавника «горбатого» кита

Для этих целей на базе геометрии рабочего колеса, спроектированного с использованием классических подходов, было создано рабочее колесо, имеющее оригинальную геометрию входной кромки лопастей, выполненных по подобию строения плавника «горбатого» кита. (рис. 14).

В Таблице 2 представлены сравнительные ключевые параметры микрогидротурбины, полученные по результатам CFD-моделирования работы в ППП "FlowVision":

Таблица 2. Сравнительные энергетические характеристики микрогидротурбины

Рабочее колесо	Крутящий момент $M_{кр}$, Н·м
Исходное ($z = 3$)	0,152
Усовершенствованное ($z = 3$)	0,207

С целью выявления соответствия рабочего колеса типовому виду напорной характеристики, как и ранее, проведены аналогичные расчётные исследования в насосном режиме. Сравнительные результаты представлены на рис. 15.



Рис. 14. Рабочее колесо с лопастной системой, усовершенствованной с использованием природободобных технологий

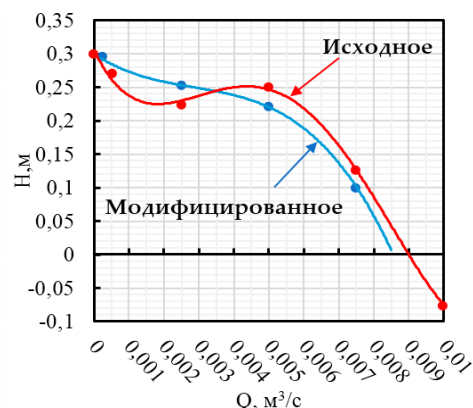


Рис. 15. Сравнительные расчётные напорные характеристики, рассчитанные в насосном режиме работы

Полученная напорная характеристика усовершенствованного рабочего колеса, демонстрирует близкую сходимость в области средних и высоких подач. Изменённый внешний вид кривых в области низких подач показывает некоторое влияние наростов на входной кромке лопастей, но позволяет утверждать о достаточной степени достоверности полученных результатов.

Экспериментальная апробация подходов к усовершенствованию проточной части, выполнялась на вновь созданном экспериментальном стенде. Для повышения достоверности результатов исследования, с каждым рабочим колесом микрогидротурбины было проведено 3 серии повторных экспериментов при одинаковых условиях. Для характеристик каждого рабочего колеса была найдена пара демонстрирующих наилучшую повторяемость данных исходя из доверительного уровня 95%. В результате обработки, итоговые энергетические характеристики микрогидротурбины в виде зависимости мощности от частоты вращения $N=f(n)$, представлены на рис. 16 для исходного и усовершенствованного рабочих колёс.

Использование данного принципа при создании лопастной системы микрогидротурбины предположительно обеспечивает более устойчивое обтекание лопастей. Применение нового подхода приводит к снижению риска возникновения отрывов и формированию структуры потока, приводящего к качественно меньшим гидравлическим потерям при обтекании. Этим, предположительно, обусловлен прирост вырабатываемой мощности микрогидротурбины с усовершенствованным рабочим колесом на ~20%.

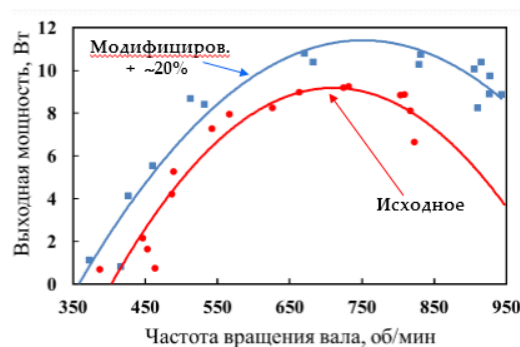


Рис. 16. Сравнительная характеристика $N=f(n)$ микрогидротурбины с исходным и модифицированным рабочим колесом

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложена конструктивная компоновка комбинированного энергетического комплекса на основе низконапорных (до 2 м) микроГЭС, способная эффективно обеспечивать автономного потребителя одновременно тепловой и электрической энергией.
2. Разработан метод предварительной оценки эффективности гидравлической части энергетического комплекса с учётом индивидуальной конфигурации проточной части, позволяющий спрогнозировать энергетические характеристики комплекса на ранней стадии проектирования.
3. Выполнены расчётно-численные и экспериментальные исследования модели и макета гидроагрегата для получения его энергетических характеристик и проверки их достоверности.
4. С целью апробации метода и оценки его эффективности созданы 3 экспериментальных стенда для исследования энергетических характеристик низконапорных микротурбин.
5. Разработана и отлажена технология изготовления рабочего колеса гидротурбины FDM-методом с использованием 3D-прототипирования.
6. Доказана работоспособность гидравлической части комбинированного энергетического комплекса предложенной компоновки.
7. Подтверждена энергетическая эффективность применения «эффекта плавника кита» для лопастных систем гидротурбин осевого типа.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России для опубликования основных научных результатов:

1. Дружинин А.А., Парыгин А.Г., Волков А.В., Вихлянецв А.А., Наумов А.В., Куличихин В.В. К вопросу о совершенствовании элементов проточной части малых и микрогидротурбин для автономных энергоисточников // Насосы. Турбины. Системы. – 2018. - №3(28). – с.62–75.
2. Волков А. В., Парыгин А. Г., Вихлянецв А. А., Дружинин А. А. К вопросу об оптимизации проточной части рабочих колёс центробежных насосов // Надёжность и безопасность энергетики. - 2018. – Т.11. – №4. – С.311–318.
3. Логинова Н.А., Волков А.В., Дружинин А.А., Вихлянецв А.А., А.М. Грибков Б.М. Орахелашвили А.К. Лямасов С.Н. Панкратов, С.Н. Черкасских, В.Л. Островский, А.И. Давыдов, Д.Х. Цакирис Исследование устойчивости параметров системы автоматического управления комплексом тригенерации на базе микроГЭС // Насосы. Турбины. Системы. – 2019. - №2(31). – с.14–22.
4. Вихлянецв А.А., Волков А.В., Яворовский Ю.В., Дружинин А.А. Метод автоматизированного профилирования элементов проточной части центробежных насосов для топливно-энергетического комплекса // Надёжность и безопасность энергетики. - 2019. – Т.12. – №4. – с. 260–267.

Научные статьи в изданиях, входящих в международную базу цитирования Scopus:

1. Volkov A.V., Parygin A.G., Ryzhenkov A.V., Druzhinin A.A., Ivanov A.S., Shitov E.M. On possibilities of creating systems for autonomous power supply of pipeline cathodic protection stations (Волков А.В., Парыгин А.Г., Рыженков А.В., Дружинин А.А., Иванов А.С., Шитов Е.М. О возможностях создания систем автономного энергоснабжения станций катодной защиты трубопроводов) // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences №70, 2016. p.561-569 URL: http://www.rjpbcs.com/2016_7.6.html
2. Volkov A.V., Parygin A.G., Ryzhenkov A.V., Druzhinin A.A., Naumov A.V. Optimization algorithm of parameters of the low head micro hydraulic power plant at an early design stage (Волков А.В., Парыгин А.Г., Рыженков А.В., Дружинин А.А., Наумов А.В. Алгоритм оптимизации параметров низконапорной микроГЭС на ранней стадии проектирования) // International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562

Volume 11, Number 22 (2016) pp. 10878-10886. Research India Publications.
URL:<http://www.ripublication.com/Volume/ijaerv11n22.htm>

3. Volkov A.V., Parygin A.G., Naumov A.V., Vikhlyantsev A.A., Druzhinin A.A., Grigoriev S.V. Application of Methods of the Optimum Control Theory for Development of High Efficiency Centrifugal Pumps (Волков А.В., Парыгин А.Г., Наумов А.В., Вихлянцев А.А., Дружинин А.А. Применение методов теории оптимального управления для проектирования высокоэффективных центробежных насосов) // International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 12, Number 19 (2017) pp. 8768-8778. Research India Publications. URL: <http://www.ripublication.com/Volume/ijaerv12n19.htm>
4. F. Pohylý, M. Haluza, S. Fialová, L. Dobšaková, A.V. Volkov, A.G. Parygin, A.V. Naumov, A.A. Vikhlyantsev, A.A. Druzhinin Application of heterogeneous blading systems is the way for improving efficiency of centrifugal energy pumps (Ф. Похилы, М. Халуза, С. Фиалова, Л. Добшакова, Волков А.В., Парыгин А.Г., Наумов А.В., Вихлянцев А.А., Дружинин А.А. Применение гетерогенных лопастных систем как способ повышения эффективности центробежных энергетических насосов) // Thermal Engineering ISSN 0040-6015, Volume 64, Number 11 (2017) pp. 794–801. Pleiades Publishing, Inc. DOI: 10.1134/S0040601517110088. - URL: <https://link.springer.com/article/10.1134%2FS0040601517110088> . - http://www.tepen.ru/files/arxiv/2017/meta_dat_11_17.pdf .
5. Volkov A.V., Ryzhenkov A.V., Parygin A.G., Naumov A.V., Druzhinin A.A., Vikhlyantsev A.A., J. Šoukal, M. Sedlař, M. Komárek, F. Pohylý, P. Rudolf, S. Fialová Matters concerned with development of autonomous cogeneration energy complexes on the basis of microhydropower plants (Волков А.В., Рыженков А.В., Парыгин А.Г., Наумов А.В., Дружинин А.А. Вихлянцев А.А., И. Шоукал, М. Седларж, М. Комарек, Ф. Похилы, П. Рудольф, С. Фиалова Проблемы развития автономных когенерационных энергетических комплексов на основе микрогидроэнергетики) // ISSN 0040-6015, Thermal Engineering, 2018, Volume 65, Number 11, pp. 799–805. Pleiades Publishing, Inc. 2018. DOI: 10.1134/S0040601518110083. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1134%2FS0040601518110083>
6. Volkov A.V., Parygin A.G., Vikhlyantsev A.A., Druzhinin A.A., S.V. Grigoriev, G.V. Sobolev Verification of approaches of optimal control theory for the case study of low emission high head pump for petroleum and chemical industry (Волков А.В., Парыгин А.Г., Вихлянцев А.А., Дружинин А.А., Григорьев С.В., Соболев Г.В. Верификация подходов теории оптимального управления на примере малорасходного

высоконапорного насоса для нефтегазовой и химической промышленности) // International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET) ISSN Print: 0976-6340 and ISSN Online: 0976-6359 Volume 9, Issue 8. August 2018. pp. 1206–1215. IAEME Publication. - URL: <http://www.iaeme.com/ijmet/issues.asp?JType=IJMET&VType=9&IType=8>

7. Volkov A.V., Parygin A.G., Vikhlyantsev A.A., Druzhinin A.A., Naumov A.V. An analytical method for predicting hydraulic head losses in the outlet of centrifugal pump (Волков А.В., Парыгин А.Г., Вихлянцев А.А., Дружинин А.А., Наумов А.В. Аналитический метод расчета гидравлических потерь напора в отводе центробежного насоса) // International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET) ISSN Print: 0976-6340 and ISSN Online: 0976-6359 Volume 9, Issue 10. October 2018. pp. 1228–1239. IAEME Publication. - Author ID: 57192078235. - URL: <http://www.iaeme.com/ijmet/issues.asp?JType=IJMET&VType=9&IType=10>
8. Druzhinin A.A., Orlova E.S., Volkov A.V., Parygin A.G., Naumov A.V., Ryzhenkov A.V., Vikhlyantsev A.A., J. Šoukal, M. Sedlař, M. Komárek, F. Pochylý, P. Rudolf, S. Fialová Improving the efficiency of small and micro hydroturbines based on the application of nature imitation technologies for creating autonomous energy sources (Дружинин А.А., Орлова Е.С., Волков А.В., Парыгин А.Г., Наумов А.В., Рыженков А.В., Вихлянцев А.А., И. Шоукал, М. Седларж, М. Комарек, Ф. Похилы, П. Рудольф, С. Фиалова Повышение эффективности малых и микрогидротурбин на основе применения природоподобных технологий для создания автономных источников энергии) // ISSN 0040-6015, Thermal Engineering, 2019, Volume 66, Number 12, pp. 944–952. Pleiades Publishing, Inc., 2019. DOI: 10.1134/S0040601519120024.
9. Vikhlyantsev A.A., Naumov A.V., Volkov A.V., Druzhinin A.A., Lyamasov A.K., Pankratov S.N., Orahelashvily B.M. Optimization methods to improve energy efficiency of centrifugal pumps at thermal power plants (А.А. Вихлянцев, А.В. Наумов, А.В. Волков, А.А. Дружинин, А.К. Лямасов, С.Н. Панкратов, Б.М. Орахелашвили Оптимизационные методы повышения энергетической эффективности центробежных насосов для ТЭС) // International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE). - ISSN 2277-3878. – Volume 8. – Issue 4. – pp. 9617-9625 – November, 2019. Published By: Blue Eyes Intelligence Engineering & Sciences Publication. - DOI:10.35940/ijrte.D9987.118419
10. Volkov A.V., Vikhlyantsev A.A., Druzhinin A.A., Ryzhenkov A.V., Pankratov S.N., Orahelashvily B.M., Lyamasov A.K. Optimization of Microturbines for Combined Energy Sources Based on Microhydropower Plants (А.В. Волков, А.А. Вихлянцев, А.А.

Дружинин, А.В. Рыженков, С.Н. Панкратов, Б.М. Орахелашвили, А.К. Лямасов Совершенствование методов оптимизации микро гидротурбин для комбинированных источников энергии на базе микроГЭС) // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE). - ISSN: 2278-3075. – Volume 9. – Issue 1. – pp. 3981-3987 - November, 2019. - Published By: Blue Eyes Intelligence Engineering & Sciences Publication. - DOI:10.35940/ijitee.A5070.119119.

11. Vikhlyantsev A.A., Volkov A.V., Ryzhenkov A.V., Druzhinin A.A., J. Šoukal, M. Sedlař, M. Komárek, F. Pochylý, P. Rudolf, S. Fialová Increasing efficiency of microHPP hydroturbines functioning under variable head due to aperiodic blade system (Вихлянцев А.А., Волков А.В., Рыженков А.В., Дружинин А.А., И. Шоукал, М. Седларж, М. Комарек, Ф. Похилы, П. Рудольф, С. Фиалова Повышение эффективности гидротурбин микроГЭС, функционирующих при переменном напоре путём создания аperiodической лопастной системы) // ISSN 0040-6015, Thermal Engineering, 2020, Volume 67, Number 12, pp. 944–952. Pleiades Publishing, Inc., 2020. DOI: 10.1134/S0040601520120024.

Статьи и научные труды в других изданиях:

1. Волков А.В., Дружинин А.А. Особенности конструктивных решений объектов малой и микроэнергетики // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Двадцать вторая междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (25—26 февраля 2016 г., Москва): Тез. докл. В 3 т. Т. 3. Изд.: Издательский дом МЭИ; г. Москва; 2016 г.; с. 200. URL: <http://reepe.mpei.ru/abstracts/Documents/ree-2016-book-3.pdf>
2. Парыгин А.Г., Волков А.В., Дружинин А.А. Экспериментальные исследования низконапорной микроГЭС с сифонным водоводом и анализ её эксплуатационных параметров // Молодежный научно-технический вестник №9; Изд.: ФГБОУ ВО "МГТУ им. Н.Э. Баумана"; г. Москва; 2016 г.; с.32-39. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27258833>
3. Парыгин А.Г., Волков А.В., Дружинин А.А. Расчётные и экспериментальные исследования энергетических характеристик пропеллерной гидротурбины низконапорной микроГЭС с сифонным водоводом // Гидравлические машины, гидропневмоприводы и гидропневмоавтоматика. Современное состояние и перспективы развития: Сб. научн. тр. IX Междунар. науч.-техн. конф., 9-10 июня 2016 г.; г. Санкт-Петербург; Изд-во Политехн. ун-та; 2016 г.; с. 21-30.
4. Volkov A.V., Parygin A.G., Druzhinin A.A. Way to improve the efficiency of the propeller turbine in the head pipeline (Волков А.В., Парыгин А.Г., Дружинин А.А. Способ

- повышения эффективности пропеллерной турбины в напорном водоводе) // Sborník abstraktů konferenčních příspěvků 23 mezinárodní konference o vodní energetice HydroTurbo'2016 p.30-34. URL: <http://www.hydroturbo.cz/en/list-of-papers.htm> . (Сборник аннотаций и трудов 23-ей Международной Конференции по Гидроэнергетике HydroTurbo'2016. 25-27 октября 2016 г., Чешская республика, г. Зноймо, Конференц-зал отеля "Prestige").
5. Волков А.В., Парыгин А.Г., Наумов А.В., Вихлянцев А.А., Дружинин А.А. Марков Д.В., Соболев Г.В., Григорьев С.В. Анализ возможностей совершенствования отечественных центробежных насосов для нефтегазовой и химической промышленности (Analysis of domestic centrifugal pumps improvement opportunities for the oil and gas and chemical industry) // Гидравлика. - 2016. - № 2. Сетевое издание ФГБОУ ВО "МГТУ им. Н.Э. Баумана"; г.Москва; 2016 г.; с.1-13 URL: <http://hydrojournal.ru/images/JOURNAL/NUMBER2/Volkov.pdf>
 6. Волков А.В., Дружинин А.А. Понтонная низконапорная микроГЭС с сифонным водоводом // Гидравлические машины, гидропневмоприводы и гидропневмоавтоматика: Двадцатая всероссийская научно-техническая конференция студентов и аспирантов (7 декабря 2016 г., Москва); Изд.: Издательский дом МЭИ; 2016 г.; с. 49-57. ISBN 978-5-7046-1786-0. URL: http://ggm.mpei.ru/news/Druzh_GGM'16/Reports'2016.pdf
 7. A. V. Volkov, A. G. Parygin, A. V. Ryzhenkov, A. A. Druzhinin, A. A. Vikhlyantsev On creation of highly efficient micro-hydraulic power plants of pontoon modular design in conditions of super-low flow parameters (Волков А.В., Парыгин А.Г., Рыженков А.В., Дружинин А.А., Вихлянцев А.А. К вопросу создания высокоэффективных микроГЭС понтонной модульной конструкции в условиях сверхнизких параметров потока) // Proceedings of the Scientific-Practical Conference "Research and Development - 2016". – pp.137-148. – 2017. - eBook ISBN 978-3-319-62870-7; Hardcover ISBN 978-3-319-62869-1. - Springer International Publishing. DOI 10.1007/978-3-319-62870-7. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-62870-7_15
 8. Volkov A.V., Parygin A.G., Ryzhenkov A.V., Naumov A.V., Druzhinin A.A., Vikhlyantsev A.A., Dasaev M.R. To the question about the prospects to the use of trigeneration energy sources based on hydropower (Волков А.В., Парыгин А.Г., Рыженков А.В., Наумов А.В., Дружинин А.А. Вихлянцев А.А., Дасаев М.Р. К вопросу о перспективах использования тригенерационных энергоисточников на основе гидроэнергетики) // Journal of Applied Biotechnology & Bioengineering. - ISSN: 2472-8466. Volume 5. Issue 1. - pp. 41-44. -

9. Парыгин А.Г., Волков А.В., Дружинин А.А. Исследование и оценка гидравлического сопротивления водоводов малых и микроГЭС // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Двадцать третья междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (2—3 марта 2017 г., Москва): Тез. докл. В 3 т. Т. 3. - с. 254. М.: Издательский дом МЭИ, 2017. — 448 с. ISBN: 978-5-383-01077-8.
URL: <http://reepe.mpei.ru/abstracts/Documents/ree-2017-book-3.pdf>
10. Парыгин А.Г., Волков А.В., Дружинин А.А. Проблемы энергоснабжения автономных потребителей на основе использования потенциала гидроресурсов (The problems of autonomous consumers energy supply based on the hydro resources potential use) // Гидравлические машины, гидропневмоприводы и гидропневмоавтоматика. Современное состояние и перспективы развития: Сб. научн. тр. Междунар. науч.-техн. конф., 7-8 июня 2018 г.; г. Санкт-Петербург; Изд-во Политехн. ун-та; 2018 г. – 393 с.; с. 40-55. – ISBN 978-5-7422-6220-6. – DOI 10.18720/SPBPU/2/id17-21. URL: <http://elib.spbstu.ru/dl/2/id18-21.pdf/info>
11. Volkov A.V., Ryzhenkov A.V., Parygin A.G., Druzhinin A.A., J. Šoukal Perfection of the flowing part elements of small and micro hydro turbines for autonomous energy sources. Application of the biomimicry principles and optimization approaches (Волков А.В., Рыженков А.В., Парыгин А.Г., Дружинин А.А., J. Šoukal Совершенствование элементов проточной части малых и микрогидротурбин для автономных энергоисточников. Применение принципов биомимикрии и оптимизационных подходов) // Zborník abstraktov 24. ročník medzinárodnej konferencie o vodnej energetike HydroTurbo'2018 p.16-18 (Сборник аннотаций 24-ой Международной Конференции по Гидроэнергетике HydroTurbo'2018. 25-27 сентября 2018 г., Словацкая Республика, г. Братислава, Конференц-зал отеля "Sorea Regia").
12. Боков С.О., Дружинин А.А., Наумов А.В., Волков А.В. Комбинированный источник энергии как экологически чистая альтернатива для энергоснабжения изолированных территорий // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Двадцать пятая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (14–15 марта 2019 г., Москва): Тез. докл. — М.: ООО «Центр полиграфических услуг „Радуга“», 2019. - с.1051. — 1060 с. - ISBN 978-5-905486-47-0. - URL: https://reepe.mpei.ru/abstracts/Documents/reepe_XXV.pdf
13. Шоукал И., Волков А.В., Парыгин А.Г., Дружинин А.А., Вихлянцев А.А. Разработка элементов проточной части гидравлических машин с применением принципов

- биомимикрии // Разработка, производство и эксплуатация turbo-, электронасосных агрегатов и систем на их основе: труды X-й Международной научно-технической конференции "СИИТ'19". – Воронеж: Издательско-полиграфический центр "Научная книга", 2019. – с. 38-45. – 262 с. – 250 экз. – ISBN 978-5-4446-1342-9.
- J. Šoukal, Volkov A.V., Parygin A.G., Druzhinin A.A., Vikhlyantsev A.A. The development of hydraulic machines flowing part elements using biomimicry principles // Development, manufacturing and operation of turbo pumping units and systems based on them: materials of X International scientific and technical conference "SYPT'19". – Voronezh: Publishing and printing center "Scientific book", 2019. – pp. 38-45. – 262 p. – 250 cop. – ISBN 978-5-4446-1342-9.
14. Jakub Stareček, Pavel Čupr, Alexander V. Volkov, Alexey A. Druzhinin, Miloslav Haluza Influence of pitch angle on parameters of swirl turbine with uniform and non-uniform blade cascades (Я. Старечек, П. Чупр, А. Волков, А. Дружинин, М. Халуза Влияние угла наклона на параметры вихревой турбины с равномерным и неравномерным рядом лопастей) // Experimental Fluid Mechanics. – 2019. – pp. 1-8. - DOI:10.35940 – URL: <https://efm.nti.tul.cz/>
15. Šoukal J., Sedlař M., Volkov A., Naumov A., Parygin A., Druzhinin A. Příspěvek k výběru tepelně izolačních materiálů pro akumulátory kogeneračních zdrojů „Mikropol GES“ // Sborník XXVIII ročník konference "Kotle a energetická zařízení 2019". - Březen, 11 – 13 2019. – Kongresové centrum hotelu Voroněž I. – Brno.
- Шоукал И., Седларж М., Волков А., Наумов А., Парыгин А., Дружинин А. К вопросу о выборе теплоизоляционных материалов для элементов теплового контура когенерационных источников на основе микроГЭС // Сборник 28-ой конференции "Котлы и энергетическое оборудование 2019". – 11-13 марта 2019. - Конгресс-центр отеля "Воронеж" - Брно.
16. Šoukal J., Sedlař M., Komárek M., Volkov A., Ryzhenkov A., Druzhinin A., Vikhlyantsev A., Grigoriev S., Dasaev M. Vyhodnocení účinnosti topného okruhu kogenerační elektrárny založené na mikroelektrárnách pro napájení autonomního spotřebitele // Sborník XXIX ročník konference "Kotle a energetická zařízení 2020". – 09-11.03.2020. – Kongresové centrum hotelu Voroněž I. – Brno.
- Шоукал И., Седларж М., Комарек М., Волков А., Рыженков А., Дружинин А., Вихлянцев А., Григорьев С., Дасаев М. Оценка эффективности теплофикационного контура когенерационной установки на базе микроГЭС для энергоснабжения автономного потребителя // Сборник 29-ой конференции "Котлы и энергетическое оборудование 2020". – 09-11 марта 2020. - Конгресс-центр отеля "Воронеж" - Брно.

Патенты на изобретения и полезные модели:

1. Гидравлическая низконапорная пропеллерная турбина: пат. 175269 РФ: МПК F03B 3/04, F03B 3/12, F03B 17/06 / Парыгин А.Г., Волков А.В., Рыженков А.В., Дружинин А.А.; заявитель и патентообладатель НИУ "МЭИ". – №2017110883; заявл. 31.03.2017; опубл. 29.11.2017, Бюлл. №34. - URL: http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_Ru#1525954603827
2. Приплотинная низконапорная гидроэлектростанция сифонного типа: пат. 175276 РФ: МПК F03B 13/08, E02B 9/00 / Парыгин А.Г., Волков А.В., Рыженков А.В., Дружинин А.А.; заявитель и патентообладатель НИУ "МЭИ". – №2017110884; заявл. 31.03.2017; опубл. 29.11.2017, Бюлл. №34. - URL: http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_Ru#1525954686095
3. Низконапорная гидравлическая турбина: пат. 188371 РФ: МПК F03B 3/12, F03B 17/06 / Волков А.В., Парыгин А.Г., Рыженков А.В., Дружинин А.А.; Заявитель и патентообладатель НИУ "МЭИ". – Заявл. №2018146883 от 27.12.2018; опубл. 09.04.2019, Бюлл. №10. - URL: <http://www1.fips.ru/ofpstorage/Doc/IZPM/RUNWU1/000/000/000/188/371/%D0%9F%D0%9C-00188371-00001/DOCUMENT.PDF>
4. Тригенерационный энергетический комплекс: решение о выдаче патента на изобретение №186 от 03.08.2020: МПК F25B / Волков А.В., Парыгин А.Г., Рыженков А.В., Дружинин А.А.; Заявитель и патентообладатель НИУ "МЭИ". – Заявл. №2019131832 от 25.12.2018.