УДК 621.22 doi:10.18720/SPBPU/2/id20-345

Волков Александр Викторович1 volkovav@mpei.ru Рыженков Артём Вячеславович<sup>1</sup> av ryzhenkov@mail.ru Дружинин Алексей Анатольевич<sup>1</sup> alexev2959@mail.ru Вихлянцев Александр Андреевич<sup>1</sup> alexgidro91@mail.ru Орахелашвили Баграт Мерабович<sup>1</sup> bagrat943@vandex.ru Байков Виктор Назипович<sup>1</sup> BaikovVN@mpei.ru Jiří Šoukal<sup>2</sup> v.liskova@sigma.cz Milan Sedlař<sup>2</sup> m.sedlar@sigma.cz Martin Komárek<sup>2</sup> chv@sigma.cz František Pochvlý<sup>3</sup> pochyly@fme.vutbr.cz Pavel Rudolf<sup>3</sup> rudolf@fme.vutbr.cz Simona Fialová<sup>3</sup> fialova@fme.vutbr.cz

¹ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ», Россия, г. Москва

<sup>2</sup>Centrum hydraulického výzkumu spol. s r. o. "Sigma" (Центр гидравлических исследований «Sigma»), Чешская республика, г. Лутин

<sup>3</sup>Vysoké učení technické v Brně (Технический университет г. Брно),
Чешская республика, г. Брно

### ПРИМЕНЕНИЕ НОВЫХ ПОДХОДОВ К СОЗДАНИЮ ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМБИНИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ АВТОНОМНОГО ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

Аннотация. В докладе рассмотрены новые научные подходы к созданию комбинированного когенерационного энергетического комплекса

на основе малой или микрогидроэнергетики. В частности, рассмотрены наиболее эффективные для объектов микрогидроэнергетики подходы к созданию работоспособной конструктивной компоновки и проектированию для них гидротурбин малого и микро классов, обладающих высокой энергоэффективностью. Разработан критерий, позволяющий проводить оценку энергетической эффективности гидротурбин на ранней стадии проектирования расчётным методом, включающим прогнозную оценку функции гидравлического сопротивления  $\xi_{\Gamma\Gamma} = f(Re)$ конкретной геометрии водовода. Изложены результаты теоретической задачи по созданию технологичной конфигурации лопастной системы с использованием теории Н. Е. Жуковского. Расчётно-численным моделированием гидродинамических решёток плоских профилей подтверждены и дополнены теоретические номограммы определения коэффициентов  $C_x$ ,  $C_v$ . Представлена серия сравнительных результатов расчётных и экспериментальных исследований гидравлической части комбинированного энергетического комплекса – микрогидротурбины с экспериментальными лопастными системами, в том числе с модифицированной по принципу биомиметики (природоподобных технологий). На основе расчётных и экспериментальных исследований, показана перспективность выбранного направления развития малой и микрогидроэнергетики, а также эффективность подходов, которые были использованы при проектировании рабочих органов микрогидротурбин.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (уникальный идентификатор проекта RFMEFI58618X0060) и Министерства образования, молодёжи и спорта Чешской Республики (уникальный идентификатор проекта LTARF18).

**Ключевые слова**: энергетика, промышленность, центробежный, насос. КПД, кавитация.

Volkov Alexander<sup>1</sup>
volkovav@mpei.ru
Ryzhenkov Artem<sup>1</sup>
av\_ryzhenkov@mail.ru
Druzhinin Alexey<sup>1</sup>
alexey2959@mail.ru
Vikhlyantsev Alexander<sup>1</sup>
alexgidro91@mail.ru
Orakhelashvili Bagrat<sup>1</sup>
hg@hydrogas.ru

Baikov Viktor<sup>1</sup>
hg@hydrogas.ru
Jiří Šoukal<sup>2</sup>
v.liskova@sigma.cz
Milan Sedlař<sup>2</sup>
m.sedlar@sigma.cz
Martin Komárek<sup>2</sup>
chv@sigma.cz
František Pochylý³
pochyly@fme.vutbr.cz
Pavel Rudolf³
rudolf@fme.vutbr.cz
Simona Fialová³
fialova@fme.vutbr.cz

<sup>1</sup>NPU «MPEI», Russia, Moscow

<sup>2</sup>Centrum hydraulického výzkumu spol. s r.o. "Sigma" (Hydraulic Research Center "Sigma"), Česká republika, Lutín <sup>3</sup>Vysoké učení technické v Brně (Brno Technical University), Česká republika, Brno

# APPLICATION OF NEW APPROACHES TO THE HYDROPOWER COMBINED COMPLEX CREATION FOR AUTONOMOUS ENERGY SUPPLY

**Abstract.** The report examined new scientific approaches to the creation of a combined cogeneration energy complex based on small or micro-hydropower. In particular, the most effective approaches to micro-hydropower facilities were considered to create a workable structural layout and design small and micro-class hydroturbines with high energy efficiency for them. A criterion has been developed that makes it possible to evaluate the energy efficiency of hydro-turbines at an early stage of design using the calculation method, including a predictive estimate of the hydraulic resistance function  $\xi_{ht} = f(Re)$  of a particular penstock geometry. The results of the theoretical task of creating a technologically advanced configuration of a blade system using Nicholas E. Zhukovsky theory. By calculating and numerically (CFD) simulating the hydrodynamic lattices of flat profiles, the theoretical nomograms for

determining the coefficients  $C_x$  and  $C_y$  are confirmed and supplemented. A series of comparative results of computational and experimental studies of the combined energy complex hydraulic part — microhydroturbines with experimental blade systems, including those modified by the principle of biomimetics (nature imitation technologies) is presented. Based on the calculated and experimental studies, the prospects of the chosen direction of development of small and microhydroenergy are shown, as well as the effectiveness of the approaches that were used in the design of the working bodies of microhydroturbines.

This work was financially supported by the Russian Federation Ministry of Science and Higher Education (unique project identifier is RFMEFI58618X0060) and by the Czech Republic Ministry of Education, Youth and Sports (unique project identifier is LTARF18).

**Keywords**: energy, efficiency, hydropower, hydroturbine, blade, biomimetics.

#### Введение

Развитые страны Европы (например, Чешская, Словацкая Республики, Российская Федерация) схожи по уровню гидроресурсов и особенностям рельефа местности. Гидроэнергетический



Рис. 1. Пример низконапорного переката р. Урал, Россия

потенциал этих стран в современных условиях является практически полностью освоенным с помощью генерирующих мощностей крупных ГЭС. Однако с повестки дня не сняты вопросы по энергообеспечению децентрализованных (автономных) потребителей, зачастую территориально расположенных вблизи малых рек и других водных объектов, обладающих небольшими геодезическими напорами около 2—3 м и малым располагаемым расходом (рисунок 1). Поэтому задача по созданию высокоэффективных источников энергии на основе экологически чистых технологий и с использованием возобновляемых источников энергии для автономного энергоснабжения является очень актуальной.

### Разработка схемного решения

В ходе проработки концепции построения комбинированного источника энергии была предложена схема комбинированного энергоснабжения автономного потребителя на основе микро-ГЭС [1] с встроенной турбиной осевого типа в проточную часть водовода в виде сифона (рисунок 2).

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;

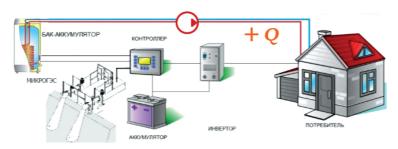


Рис. 2. Схема автономного энергоснабжения на основе микроГЭС

принцип модульности (наращивание установленной мощности в зависимости от нужд потребителя).

Анализ возможности применения различных конструктивных схем микро ГЭС при его проработке показал, что задача по созданию комбинированного источника энергии в условиях низких напоров (H=2-3 м) для рассматриваемой области гидроэнергетики значительно усложняются. Это связано с рядом факторов, среди которых необходимо особо отметить низкий КПД типов гидромашин в области малых располагаемых напоров.

### Метод предварительной оценки эффективности микрогидротурбины

Разнообразие природно-климатических условий нашей страны, а также отсутствие существующих типов гидромашин, способных эффективно работать в условиях малых напоров и расходов рабочей среды привели к необходимости использования новых подходов к их проектированию. Основываясь на поставленной проблематике, была разработана усовершенствованная методика проектирования пропеллерной гидротурбины микро-ГЭС с напорным водоводом [2, 3], заключающаяся в предварительной оценке энергетической эффективности микроГЭС и позволяющая оптимизировать расчётные параметры гидротурбины в её составе на ранних стадиях проектирования. Энергетическая эффективность гидротурбины в составе микроГЭС оценивается по коэффициенту использования энергии  $K_N$ :

$$K_N(h,\eta) = \frac{N_{\Gamma\Gamma}}{N} = \eta \cdot \sqrt{1 - \eta \cdot (2 - \eta)}, \tag{1}$$

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

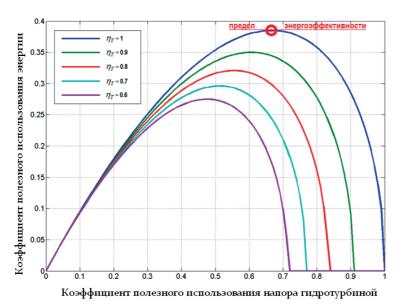
Функция (1) численно характеризует долю располагаемой гидравлической энергии водовода, срабатываемую гидротурби-

ной, 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  $K_N(h,\eta)$ :

$$h_{opt} = \frac{2}{3 \cdot \left(2 - \eta_{\text{max}}\right)},\tag{2}$$

На рисунке 3 представлена графическая интерпретация предела энергетической эффективности микрогидротурбин различного типоразмера ( $\eta = var$ ).

Этот предел для гидротурбины, установленной в напорном водоводе, является гидравлическим аналогом предела Беца-Жуковского, известного в теории ветроэнергетики [4] и позволяет оценить энергетическую эффективность гидротурбины в составе микроГЭС на ранних стадиях проектирования, а также более грамотно оптимизировать её расчётные параметры.



*Puc. 3.* Графическая иллюстрация предела энергетической эффективности

## Создание лопастной системы с использованием теории Н. Е. Жуковского

С целью упрощения технологии изготовления снижения затрат при изготовлении рабочего колеса микрогидротурбины, была рассмотрена возможность 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:

$$P_x = C_x \cdot \rho \frac{w^2}{2} \cdot I,\tag{3}$$

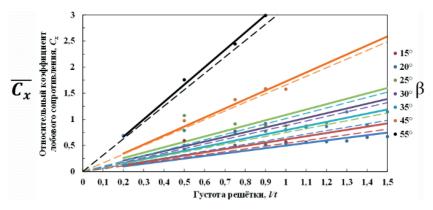
$$P_{y} = C_{y} \cdot \rho \frac{w^{2}}{2} \cdot I, \tag{4}$$

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, предложенные Ломакиным [4] и Барлитом [5]. 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.

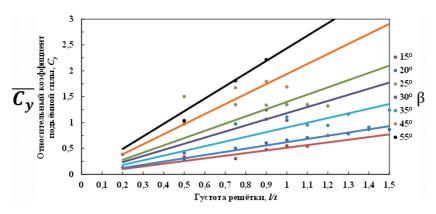
На рисунке 4 штрих-пунктирными линиями представлены известные значения номограммы  $C_x = f(l/t)$  которые сопоставлены с основными линиями подтверждающих результатов расчётно-экспериментального исследования номограммы  $C_v = f(l/t)$ .

На рисунке 5 изображены новые данные: расчётно-экспериментальным методом полученная номограмма  $C_y = f(l/t)$ , необходимая для дополнения входных параметров при проектировании лопастной системы.

Таким образом, показано, что результаты расчётно-теоретических исследований гидродинамической решётки плоских профилей с варьируемыми параметрами (l- длины профиля,  $\beta-$  угла установки лопасти, t- шага решётки) могут быть использованы



*Рис.* 4. Результаты верификации номограммы  $C_x = f(l/t, \beta)$ 



*Puc. 5.* Номограмма  $C_y = f(l/t, \beta)$ , полученная расчётно-экспериментальным методом

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. Исследования в данном направлении проводились и в Техническом университете г. Брно, результаты которых представляют собой оптимизацию гидродинамической решётки по крутящему моменту [6].

Данные расчётно-теоретические исследования были проведены в CFDкоде с использованием чешской автоматизированной многомашинной вычислительной станции «Sigma» проектирования и оптимизации гидродинамических машин и систем, а также российского расчётного ПО «FlowVision» непосредственно для моделирования.

Рабочее колесо (рисунок 6), созданное в новой конфигурации имеет 8 лопастей в виде плоских пластин и спроектировано на следующие расчётные параметры:

- мощность  $N = 25 \, \mathrm{Bt}$ ;
- 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, была создана её модель, состоящая из гидротурбины, встроенной в водовод в виде сифона и системы управления электрической машиной. Она была экспериментально апробирована с использованием гидродинамического лотка лаборатории гидроаэромеханики НИУ «МЭИ». Характеристика мощности N = f(n), полученная по результатам экспериментальных исследований показала, что  $N_{\rm max} = 18$  Вт при расчётной частоте вращения. Её внешний вид представлен на рисунке 7.

Для повышения достоверности полученных результатов, на базе действующей инфраструктуры лаборатории гидроаэромеханики НИУ «МЭИ» (рисунок 8) был создан *макет* гидравлической



 $\it Puc.~6.$  Рабочее колесо, спроектированное с использованием теории Н. Е. Жуковского



 $\mathit{Puc}.$  7. Экспериментальная характеристика  $\mathit{N} = \mathit{f}(\mathit{n})$  модели микроГЭС

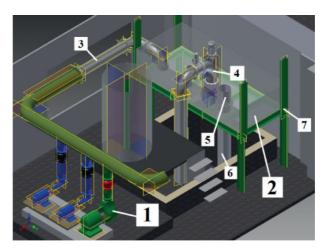


Рис.  $8. \ 3D$ -модель экспериментального стенда-макета гидравлической части комбинированного энергетического комплекса: 1- циркуляционный насос стенда, 2- верхний бьеф, 3- напорный трубопровод, 4- водовод в виде сифона с гидротурбиной и электрической машиной в сборе, 5- переливной трубопровод, 6- нижний бьеф



*Puc.* 9. Временная осциллограмма параметров гидравлической части комплекса

части комбинированного энергетического комплекса со следующими расчётными параметрами:

- мощность N = 1500 Bt;
- частота вращения n = 1000 об/мин;
- расчётный напор  $H_n = 2.5$  м;
- диаметр колеса D = 250 мм.

По результатам экспериментальных исследований макета, была получена временная осциллограмма (рисунок 9) ключевых параметров гидравлической части комплекса — мощности и частоты вращения N, n = f(t). Её внешний вид показывает три основных режима работы — насосный, переходный и генераторный (основной).

Анализ данной осциллограммы показывает, что проектирование лопастной системы рабочего колеса необходимо вести на *насосный режим* для обеспечения гарантированного заполнения проточной части при запуске энергетического комплекса в работу.

# Совершенствование лопастной системы гидротурбины для повышения работоспособности

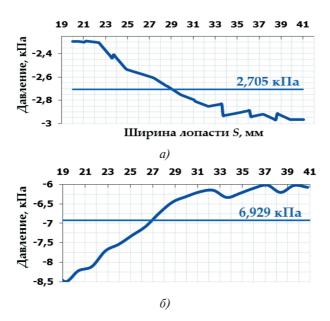
Созданное ранее рабочее колесо отличается высокой густотой лопастной системы, что значительно осложняет эксплуатацию микрогидротурбины в реальных условиях. Например, в паводковый период, когда высока вероятность попадания посторонних предметов в проточную часть.

С целью максимального снижения риска потери работоспособности в подобных условиях, было 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 (рисунок 10), отличается меньшим количеством лопастей (z=3) для существенного увеличения размеров межлопастного канала, а лопасти рабочего колеса спрофилированы по трём характерным сечениям.

На рисунке 11 представлены эпюры распределения давления в межлопастном канале рабочего колеса по результатам CFD-моделирования в ППП «FlowVision»: a — на входе,  $\delta$  — на выходе.



*Puc. 10.* Рабочее колесо, спроектированное с использованием классических подходов



*Puc. 11.* Эпюры распределения давления в межлопастном канале рабочего колеса

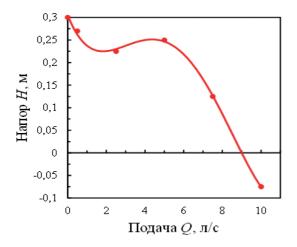
Анализ данных, полученных в результате построения эпюр, позволил оценить перепад давления, который на рабочем колесе составил  $\Delta P = 4.2 \text{ к}\Pi a$ .

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 <i>N</i> , Вт	Крутящий момент $M_{\mathrm{kp}}$ , Н · м
Исходное ( $z = 8$ )	9,95	0,103
Hовое $(z=3)$	16,9	0,152

С целью выявления соответствия рабочего колеса типовому виду напорной характеристики, присущей осевым гидромашинам, были проведены его расчётные исследования в насосном режиме. Результаты представлены на рисунке 12. Полученная



*Puc. 12.* Расчётная напорная характеристика, рассчитанная в насосном режиме работы

напорная характеристика исследуемого рабочего колеса, имеющего коэффициент быстроходности  $n_s = 635$ , демонстрирует привычный для осевых насосов вид.

Анализ полученных результатов 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.

# Повышение эффективности микрогидротурбины в основном режиме работы

Повышение эффективности гидравлической части комбинированного энергетического комплекса проводилось с использованием нового популярного в научном мире направления — природоподобных технологий [7]. При этом особое внимание было уделено биологическим видам, среда обитания которых имеет близкие характеристики с областью работы гидравлических машин. Было установлено, что Горбатые киты (рисунок 13) используют особенности строения своих грудных плавников, имеющих морфологические наросты рядного расположения на передней кромке.



Рис. 13. Фотоснимок строения плавника горбатого кита

Мировыми исследователями было высказано предположение, что данные бугорки могут способствовать изменению гидродинамики обтекания плавника для повышения эффективности его маневрирования. Так, в Техническом университете г. Брно были проведены расчётные исследования [8] по установлению влияния формы и размеров данных наростов на характер обтекания тела (рисунок 14). Было установлено, что расположение, размер и количество наростов оказывают влияние на условия обтекания рабочих органов микрогидротурбин, связанное с улучшением гидродинамических характеристик потока в проточной части.

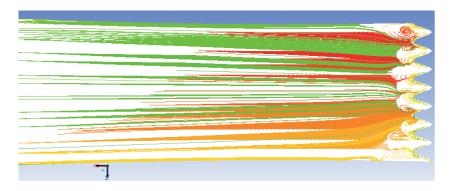


Рис. 14. Линии тока, полученные при CFD моделировании процессов обтекания поверхностей, подобных строению плавника горбатого кита

С целью экспериментальной апробации данного подхода были 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.

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 (рисунок 15).



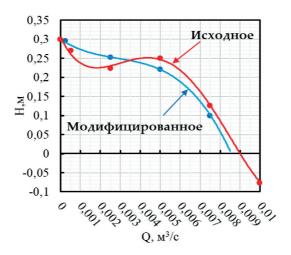
Рис. 15. Рабочее колесо с лопастной системой, усовершенствованной с использованием природободобных технологий

В таблице 2 представлены сравнительные ключевые параметры микрогидротурбины, полученные по результатам CFD моделирования работы в  $\Pi\Pi\Pi$  «FlowVision».

Таблица 2 Сравнительные энергетические характеристики микрогидротурбины

Рабочее колесо	Крутящий момент $M_{\mathrm{kp}}$ , Н $\cdot$ м
Исходное $(z=3)$	0,152
Усовершенствованное ( $z = 3$ )	0,207

С целью выявления соответствия рабочего колеса типовому виду напорной характеристики, как и ранее, были проведены аналогичные расчётные исследования в насосном режиме. Сравнительные результаты представлены на рисунок 16.



*Рис. 16.* Сравнительные расчётные напорные характеристики, рассчитанные в насосном режиме работы

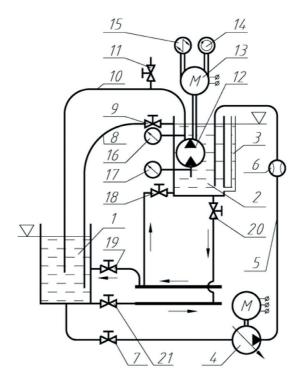
Полученная напорная характеристика усовершенствованного рабочего колеса, демонстрирует близкую сходимость в области средних и высоких подач. Изменённый внешний вид кривых в области низких подач показывает некоторое влияние наростов на входной кромке лопастей, но позволяет утверждать о достаточной степени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

Экспериментальная апробация подходов к усовершенствованию проточной части, выполнялась с использованием экспериментального стенда для исследования энергетических характеристик микрогидротурбин НИУ «МЭИ» с водоводом в виде сифона, схема которого представлена на рисунке 17.

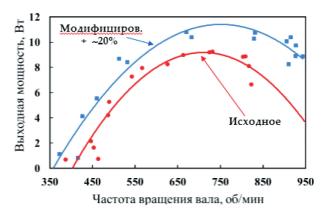
На рисунке 17 приняты следующие обозначения: 1 — резервуар нижнего бьефа (НБ); 2 — резервуар верхнего бьефа (ВБ); 3 — пьезометр; 4 — насосный агрегат; 5 — байпасный трубопровод; 6 — расходомер подачи насосного агрегата; 7 — гидравлический затвор; 8 — переливной сбросной трубопровод; 9 — задвижка регулирования уровня отметки  $\nabla$ BБ; 10 — водовод в виде сифона; 11 — клапан срыва вакуума проточной части водовода;

12 — гидравлическая микро турбина; 13 — обратимая электрическая машина; 14 — датчик частоты вращения вала; 15 — тензометрический датчик измерения крутящего момента на валу; 16, 17 — мановакуумметры перепада давления на рабочем колесе гидравлической микро турбины; 18, 19 — напорные задвижки для заполнения стенда жидкостью; 20, 21 — задвижки для удаления жидкости из стенда.

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



*Puc. 17.* Схема экспериментального стенда микрогидротурбин НИУ «МЭИ»



*Рис. 18.* Сравнительная характеристика N = f(n) микрогидротурбины с исходным и модифицированным рабочим колесом

демонстрирующих наилучшую повторяемость данных исходя из доверительного уровня 95 %. В результате обработки итоговые энергетические характеристики микротурбины в виде зависимости мощности от частоты вращения N=f(n), представлены на рисунке 18 для исходного и усовершенствованного рабочих колёс.

Использование данного принципа при создании лопастной системы микрогидротурбины обеспечивает более устойчивое безотрывное обтекание лопастей и способствует образованию устойчивых вихрей, изменяя характер обтекания рабочей стороны лопастей. Это приводит к снижению риска возникновения отрывов и формированию структуры потока, приводящего к качественно меньшим гидравлическим потерям при обтекании. Этим обусловлен прирост вырабатываемой мощности микрогидротурбины с усовершенствованным рабочим колесом ~ 20 %.

#### Выводы

Предложена конструктивная компоновка комбинированного энергетического комплекса на основе низконапорных (до 2 м)

микроГЭС, способная эффективно обеспечивать автономного потребителя одновременно тепловой и электрической энергией.

Разработан метод предварительной оценки эффективности гидравлической части энергетического комплекса с учётом потерь в водоводе, позволяющий спрогнозировать энергетические характеристики комплекса на ранней стадии проектирования.

Осуществлены расчётно-численные и экспериментальные исследования модели и макета гидроагрегата для получения его энергетических характеристик и проверки их достоверности.

Доказана работоспособность гидравлической части комбинированного энергетического комплекса предложенной компоновки.

Подтверждена энергетическая эффективность применения «эффекта плавника кита» для лопастных систем гидротурбин осевого типа.

### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (уникальный идентификатор проекта RFMEFI58618X0060) и Министерства образования, молодежи и спорта Чешской Республики (уникальный идентификатор проекта LTARF18).

### Список литературы

- 1. 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 // Thermal Engineering 2018. Volume 65, Number 11. pp. 799—805. Pleiades Publishing, Inc. 2018. ISSN00406015, DOI: 10.1134/S0040601518110083. URL: https://link.springer.com/article/10.1134 %2FS0040601518110083.
- 2. **Дружинин А. А.** К вопросу о проектировании понтонной низконапорной микроГЭС // Молодёжный научно-технический вестник. 2015. N 9. С. 14.
- 3. **Ho-Yan B. P.** Design of a Low Head Pico Hydro Turbine for Rural Electrification in Cameroon // Ontario, Canada: University of Guelph, April, 2012, 175 p. F. De Lillo, F. Cecconi, G. Lacorata, A. Vulpiani, EPL, 84 (2008)

- 4. **Ломакин А. А.** Центробежные и осевые насосы. -2-е изд. перераб. и доп. М.; Л.: Машиностроение, 1966. -364 с.
- 5. **Барлит В. В.** Гидравлические турбины. Киев : Высшая школ. 1977. 360 с.
- 6. **M. Varchola**, **T. Bielik**, **P. Hlbočan**. Methodology of 3D hydraulic design of a impeller of axial turbo machine // Engineering MECHANICS. 2013. Vol. 20, No. 2. p. 107118. Available at: http://www.engineeringmechanics. cz/pdf/20\_2\_107.pdf [quoted on June 30, 2018].
- 7. Volkov A. V., Parygin A. G., Ryzhenkov A. V., Naumov A. V., Druzhinin A. A., Vikhylantsev A. A., Dasaev M. R. To the question about the prospects to the use of trigeneration energy sources based on hydropower // Journal of Applied Biotechnology & Bioengineering. February 6, 2018. Volume 5, Issue 1. pp. 41—44. ISSN: 2472—8466, DOI: 10.15406/jabb.2018.05.00115. URL: http://medcraveonline.com/JABB/JABB-05—00115.php.
- 8. **Marcela Fojtíková.** Návrh rychlobežné vodní turbíny s tvarovanou nábežnou hranou lopatky obežného kola // Diplomová práce. Vysoké ucení technické v Brne. Brno. 2013.