

## МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БИОБЕЗОПАСНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОТОЧНЫХ ЧАСТЕЙ ГИДРОТУРБИН<sup>1</sup>

© 2023 г. А. В. Волков<sup>а</sup>, В. Ю. Ляпин<sup>а</sup>, А. А. Дружинин<sup>а</sup>, М. А. Бирюлин<sup>а</sup> \*,  
М. Ткач<sup>а</sup>, И. В. Качанов<sup>б</sup>, П. Г. Эрнандес<sup>с</sup>

<sup>а</sup>Национальный исследовательский университет “Московский энергетический институт”,  
Красноказарменная ул., д. 14, Москва, 111250 Россия

<sup>б</sup>Белорусский национальный технический университет,  
просп. Независимости, д. 65, г. Минск, 220013 Республика Беларусь

<sup>с</sup>Empresa de mantenimiento a centrales eléctricas, Unidad de Servicios Técnicos 100 y 69,  
Marianao, Cuba, 11500 Ciudad de la Habana

\*e-mail: biriulinma@mpei.ru

Поступила в редакцию 13.04.2023 г.

После доработки 25.05.2023 г.

Принята к публикации 01.06.2023 г.

Гидроэнергетика является одним из возобновляемых источников энергии и обеспечивает производство существенной доли электроэнергии во всем мире. Преимущества гидроэнергетики – это отсутствие выбросов диоксида углерода, высокая маневренность и энергетическая эффективность, однако существуют и недостатки, которые связаны с влиянием гидроэнергетических объектов на биосреду. В данной статье представлен обзор наиболее характерных воздействий элементов проточной части гидротурбин на биофауну (рыб, планктон) в процессе их эксплуатации. Рассматриваются наиболее известные конструктивные решения, позволяющие снизить вероятность негативного воздействия элементов проточной части гидротурбин на биосреду. Очевидно, что при реализации таких решений ухудшатся показатели работы гидротурбин. Однако следует учитывать, что основная цель принятия этих решений заключается в обеспечении биологической безопасности объектов, при этом их энергетическим характеристикам внимания уделяется недостаточно. В работе довольно подробно представлен один из вариантов обеспечения безопасности окружающей среды – модернизация втулки рабочего колеса путем устранения зазоров между лопастями и втулкой. С помощью численного моделирования установлено, что применение колеса с модифицированной втулкой приводит к увеличению гидравлического сопротивления, уменьшению расхода и, как следствие, снижению вырабатываемой мощности. Анализ результатов моделирования показал, что, несмотря на некоторое снижение энергетических характеристик, представляется перспективным более детальное исследование и совершенствование биологически безопасных вариантов проточных частей гидротурбин. Кроме того, сделан вывод о возможности внести дополнительные изменения в проточную часть, которые позволят компенсировать потери мощности.

**Ключевые слова:** гидравлические турбины, биобезопасные гидротурбины, сферическая форма втулки рабочего колеса, CFD-моделирование, биоресурсы, перепады давления, кавитация

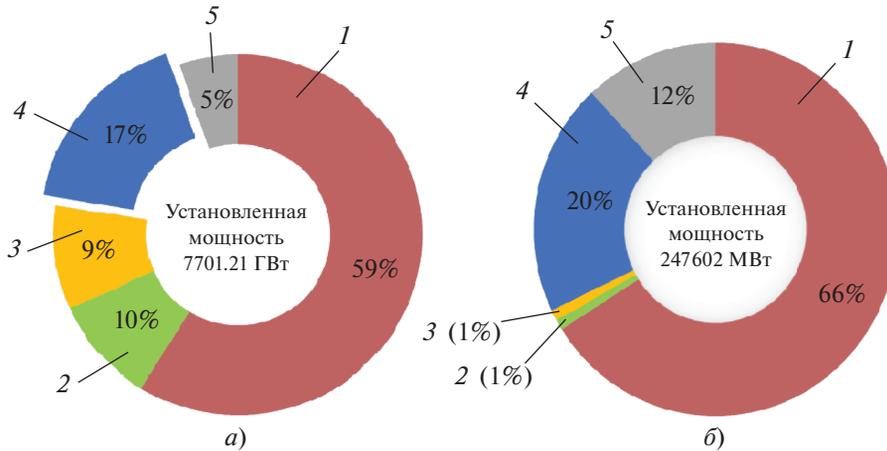
**DOI:** 10.56304/S0040363623110127

Гидроэлектростанции являются одним из важнейших источников выработки электрической энергии. Они обеспечивают значительную долю в общем объеме ее производства – 17% (рис. 1) в мире, 20% в России [1, 2]. В связи с современными тенденциями к снижению выбросов диоксида углерода и ростом спроса на электроэнергию доля ГЭС в выработке электроэнергии в ближайшие

годы будет только увеличиваться. Несмотря на то что гидроэлектростанции считаются экологически безопасными источниками энергии, их длительная эксплуатация может привести к негативным воздействиям на биоресурсы, находящиеся в водной среде. Такими воздействиями на биофауну при прохождении биосреды через проточную часть гидротурбин являются, например, перепады давления, кавитация, удары об элементы проточной части и др. [3].

По разным оценкам специалистов, гидроэнергетика в будущем будет играть одну из ведущих

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках проекта “Экологически безопасные гидромашин” при поддержке гранта НИУ МЭИ на реализацию программы научных исследований “Приоритет 2030: Технологии будущего” в 2022–2024 гг.



**Рис. 1.** Структура установленной мощности на электростанциях в мире в 2020 г. (а) и ЕЭС России в 2022 г. (б).  
Электростанции: 1 – тепловые; 2 – ветровые; 3 – солнечные; 4 – гидроэлектрические; 5 – атомные

ролей на рынке электроэнергии, поэтому при создании новых ГЭС необходимо уделять более пристальное внимание экологическим характеристикам гидроагрегатов.

Большое число опубликованных работ посвящено изучению взаимодействия биосреды и элементов проточной части гидроагрегатов; в частности, в [4] рассмотрены методики оценки эффективности работы гидротурбин и выживаемости рыб, проходящих через проточную часть гидроагрегатов ГЭС. В [5] проведен анализ выживаемости рыб после воздействия на них лопастей турбины с затупленными и скошенными кромками. Австрийский международный машиностроительный концерн Andritz Group [6] проводит исследования по разработке конструкций элементов проточной части крупных гидротурбин, которые снижали бы вероятность нанесения рыбам травм и не приводили бы к летальному исходу при взаимодействии с рабочими органами гидроагрегатов. Для гидроэнергетики малых мощностей активно ведутся эксперименты, направленные на создание биобезопасных конструкций гидротурбин; например, разработаны гидротурбины на основе винта Архимеда [7], ротора Дарье [8], а также свободно-поточные турбины [9].

В данной работе рассматриваются некоторые направления конструктивной модификации проточных частей гидротурбин для обеспечения их биологической безопасности.

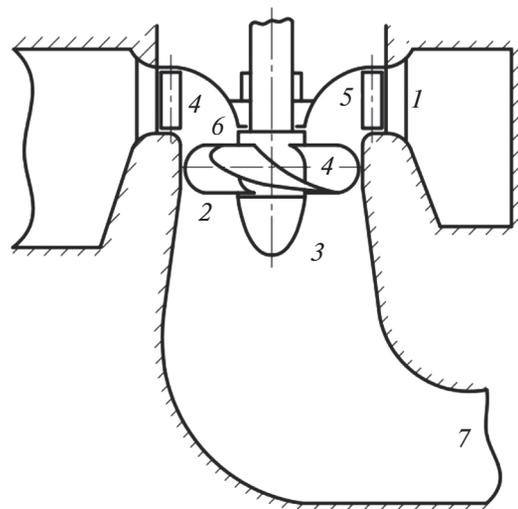
### ТИПЫ ПОВРЕЖДЕНИЙ РЫБ

Рыбы играют важную роль в водных экосистемах, и их ценность для планеты неоспорима. К сожалению, в результате освоения водных ресурсов человек может наносить значительный ущерб

обитателям водоемов, влияя на их выживаемость и сохранность.

При проходе через водоводы и элементы проточного тракта гидротурбин ГЭС рыба и планктон могут подвергаться различным воздействиям (рис. 2) [3]. Далее будет проведен анализ механизмов повреждения рыб, чтобы можно было составить более четкое представление о тех проблемах, на решение которых направлены разрабатываемые технические усовершенствования проточной части гидротурбин.

**Механические воздействия: истирание, шлифовка и удар.** Трение рыб об элементы проточной части гидротурбины (далее турбины) приводит к



**Рис. 2.** Области в проточной части турбины, которые представляют опасность для рыб.  
1 – повышенного давления; 2 – разрезания; 3 – кавитации; 4 – удара; 5 – истирания; 6 – среза; 7 – турбулентности

истиранию чешуйчатого покрова. Вероятность повреждения зависит от скорости потока, количества лопастей турбины и шага лопастной системы, а также от геометрических параметров проточной части [10]. Истиранию подвергается чешуя рыб при попадании их в небольшие зазоры (сопоставимые с размерами рыб) внутри проточной части турбины, например между передней кромкой лопасти и втулкой, лопатками направляющего аппарата и т.д.

Получить повреждения рыба может также тогда, когда сталкивается с рабочим колесом турбины. В работах [11, 12] предложена методика расчета вероятности удара о колесо в радиально-осевых и поворотных турбинах. Согласно математической модели, на которой базируется эта методика, в результате удара рыбы получают серьезную или летальную травму, однако в действительности не всегда происходит именно так [13].

Следует отметить, что четкие данные о количестве травм и летальных исходов рыб от механических повреждений отсутствуют, поэтому при сравнении результаты, полученные при проведении экспериментальных исследований и при использовании вероятностных моделей, существенно различаются.

**Влияние перепада давления.** Резкое снижение давления окружающей водной среды ниже уровня, к которому приспосабливается рыба (т.е. давления, при котором рыба находилась в статическом равновесии или нейтрально-плавучем состоянии), может привести к повреждению внутренних органов. Травмы, вызванные перепадом давления, зависят от его значения и скорости изменения давления, а также от вида рыбы [14].

Считается, что рыбы более чувствительны к понижению давления, чем к его повышению, и что гибель, связанная с изменением давления, обусловлена повреждением плавательного пузыря в результате декомпрессии [15].

В работе [16] констатируется, что меньшие значения отношения воздействующего на рыбу давления ( $p_b$ ) к давлению акклиматизации ( $p_{ак}$ ) приводят к большей летальности увлекаемых в проточный тракт рыб (рис. 3). В этой работе также выдвигаются два критерия, согласно которым давление за турбиной должно составлять либо 0.3 давления акклиматизации рыб, либо 0.6 в зависимости от вида рыбы и глубины ее обитания.

**Негативное воздействие кавитации.** Очевидно, что это явление отрицательно сказывается не только на гидромашинах, но и на биоресурсах. Так, при проведении эксперимента по воздействию кавитации на молодь лосося было обнаружено, что ее гибель составила почти 50% [17].

**Влияние турбулентности на биоресурсы.** Турбулентность является причиной образования на-

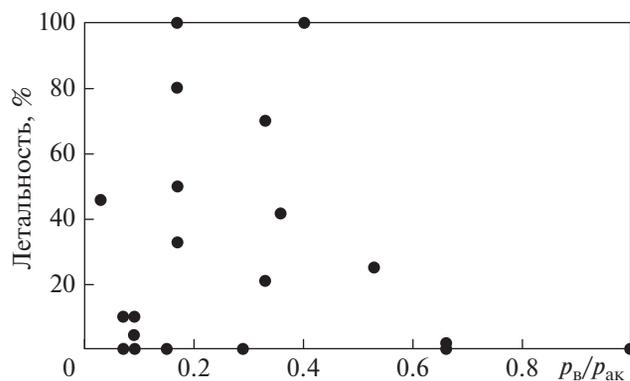


Рис. 3. Результаты лабораторных экспериментов [17] по выживаемости различных видов рыб при резком перепаде давления в проточном тракте гидротурбин

пряжений сдвига в потоке. Для того чтобы показать возможность возникновения достаточно высоких напряжений сдвига, приводящих к летальным повреждениям рыб, авторами [18] использовалось CFD-моделирование.

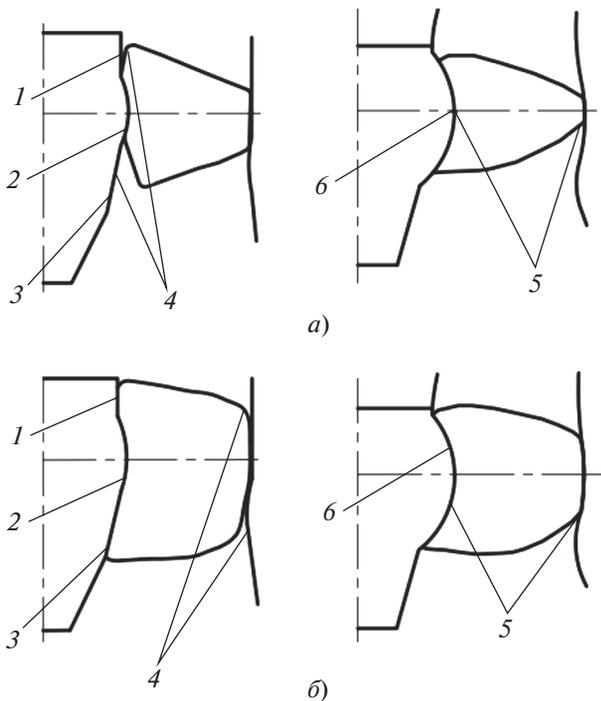
Таким образом, от указанных воздействий на биоресурсы зависят основные направления работ по совершенствованию элементов проточной части турбин, к которым относятся уменьшение пульсаций давления, улучшение обтекания лопастей, снижение турбулентности, исключение вероятности контакта рыб с элементами проточной части турбины и др.

### ИЗМЕНЕНИЯ В КОНСТРУКЦИИ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ТУРБИН ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИХ БИОБЕЗОПАСНОСТИ

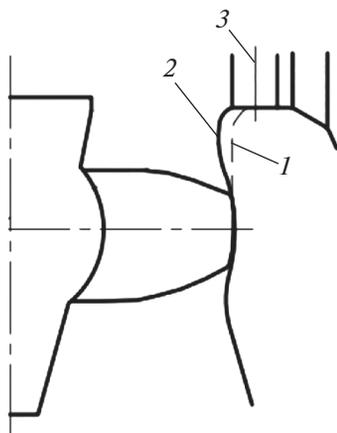
В [3] рассматриваются несколько предложений компании Voith по улучшению проточной части турбины с целью сделать их более безопасными:

- минимизация зазоров в турбинном колесе;
- уменьшение выступа лопаток направляющего аппарата;
- изменение положения лопаток направляющего аппарата и статорных колонн;
- полировка поверхностей проточной части вблизи сварных швов;
- применение водной или экологически безопасной смазки.

**Минимизация зазоров в турбинном колесе.** На рис. 4 показаны типовое рабочее и модифицированное колеса осевой турбины. Минимизация зазоров между лопастями и втулкой (см. рис. 4, а), а также между лопастями и рабочей камерой (см. рис. 4, б) снижает вероятность травмирования рыбы. Зазоры в рабочем колесе типовой турбины были уменьшены путем изменения формы втулки



**Рис. 4.** Минимизация зазоров в рабочем колесе между лопастями и втулкой (а) и между лопастями и рабочей камерой (б).  
Часть втулки: 1 – цилиндрическая, 2 – сферическая, 3 – коническая; 4 – зазоры; 5 – отсутствие щели; 6 – сферическая втулка



**Рис. 5.** Устранение вылета направляющего аппарата.  
Рабочая камера: 1 – стандартная, 2 – биобезопасная; 3 – лопатка направляющего аппарата

с цилиндрической, сферической и конической частями на полностью сферическую втулку и “утапливания” лопастей в стенку рабочей камеры.

**При уменьшении выступа лопаток (нависания) направляющего аппарата** вследствие изменения формы рабочей камеры исчезает причина воз-



**Рис. 6.** Изменение положения лопаток направляющего аппарата относительно статорных колонн.  
Направляющий аппарат: 1 – с традиционным расположением лопаток, 2 – с биобезопасным расположением лопаток; 3 – колонны статора

никновения сильных вихрей с высоким напряжением сдвига, которые (потенциально) могут навредить рыбе. Отмечается, что при уменьшении выступа направляющего аппарата также повышается КПД электростанции (рис. 5).

**Изменение положения лопаток направляющего аппарата и статорных колонн.** Перемещение лопаток направляющего аппарата (рис. 6) сведет к минимуму возможность травмирования рыбы из-за ударов и нагрузок, вызванных движением потока.

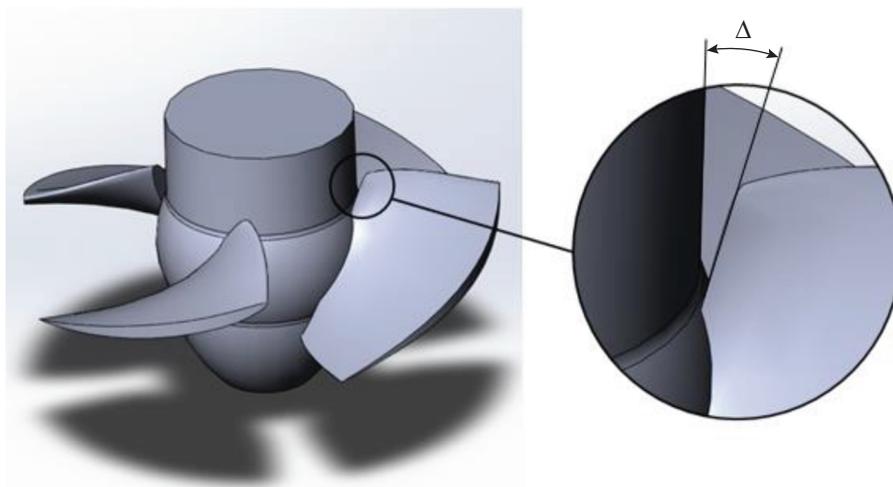
**Полировка поверхностей проточной части вблизи сварных швов.** Для того чтобы уменьшить абразивное воздействие элементов проточной части на рыбу, сварные швы на деталях турбинной системы можно сделать более гладкими, т.е. отполировать.

**Применение водной или экологически безопасной смазки** будет способствовать предотвращению попадания загрязнителей в сбрасываемую воду, таким образом исчезнет причина образования на воде ниже по течению масляной пленки, которая препятствует насыщению воды кислородом.

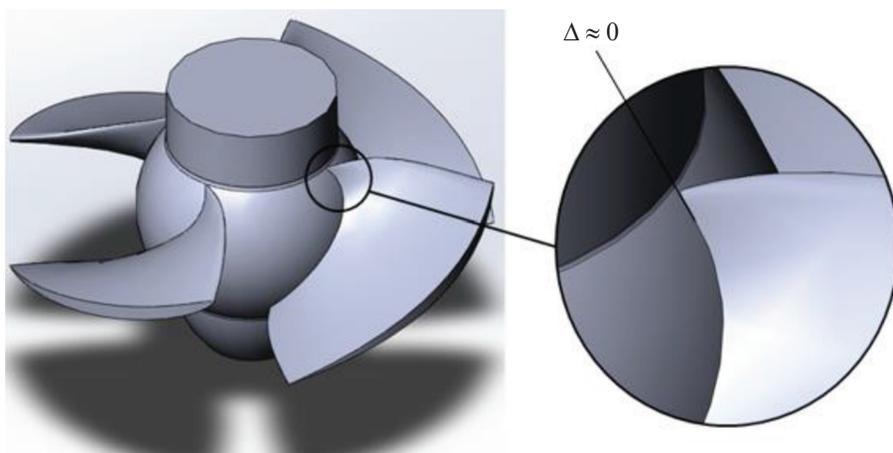
#### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ПРЕДЛОЖЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ФОРМЫ ВТУЛКИ РАБОЧЕГО КОЛЕСА НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИДРОТУРБИН

Важно обеспечить не только биобезопасность гидротурбин, но и их конкурентоспособность, поэтому для одного из ранее представленных вариантов конструктивных изменений (применение сферической втулки) было проведено исследование по изучению влияния последнего на энергетические характеристики турбины.

Были разработаны два рабочих колеса осевой гидротурбины: одно – типовое, а второе с внесен-



**Рис. 7.** Модель рабочего колеса осевой турбины с втулкой традиционной конструкции, в которой присутствуют зазоры размером  $\Delta$



**Рис. 8.** Модель рабочего колеса осевой турбины, имеющего биобезопасную конструкцию, в которой зазоры между лопастями и втулкой устранены ( $\Delta \approx 0$ ) в результате применения втулки сферической формы

ными изменениями, обеспечивающими его биобезопасность.

Параметры типового колеса гидротурбины следующие:

Напор, м .....	4
Расход, $\text{дм}^3/\text{с}$ .....	130
Частота вращения, $\text{мин}^{-1}$ .....	1500
Втулочное отношение .....	0.45
Внешний диаметр, мм .....	200
Количество лопастей .....	4

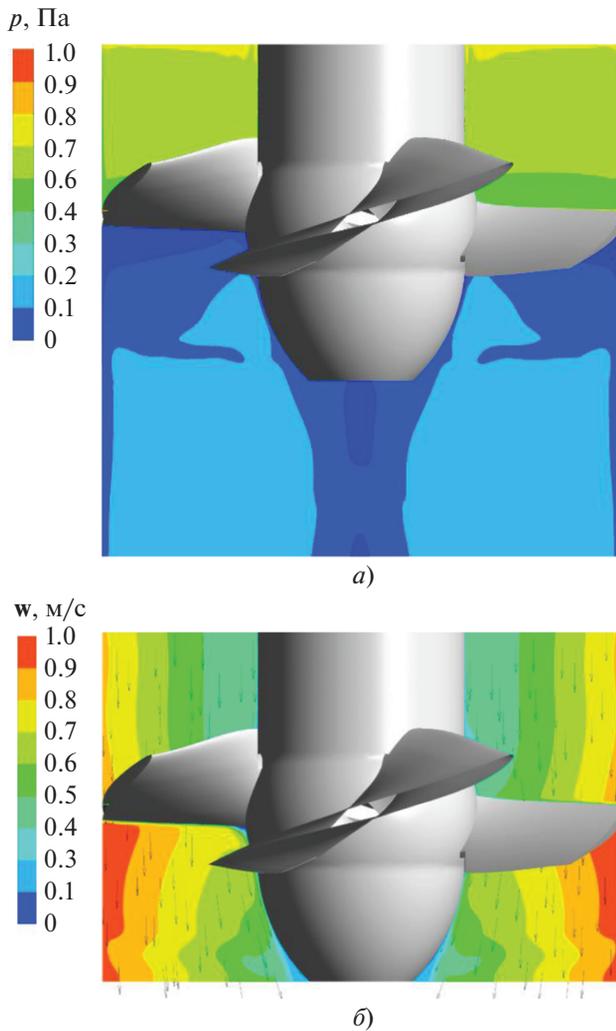
Для численного моделирования использовался пакет ANSYS Workbench. Соответствующая 3D-модель рабочего колеса показана на рис. 7.

<sup>2</sup> Втулочное отношение определяется как отношение внешнего диаметра колеса к диаметру втулки.

Согласно рассмотренным ранее предложениям, биобезопасность конструкции колеса достигается минимизацией зазоров между втулкой и лопастями благодаря изменению формы втулки. При сохранении габаритных размеров проточной части турбины увеличена сферическая часть втулки рабочего колеса, разработанного по стандартному проекту, до точки, в которой перекрываются зазоры лопастей (рис. 8).

#### Построение сетки

В модуле ANSYS Mesh была построена сетка из тетраэдров для модели, импортированной из CAD-системы (см. рис. 7, 8). Угол между нормальными соседних граней тетраэдров составлял  $60^\circ$ , а пристеночный слой – из восьми призматических подслоев с равномерным увеличением каждого



**Рис. 9.** Распределение давлений  $p$  (а) и векторы скорости  $w$  (б) в турбине традиционной конструкции

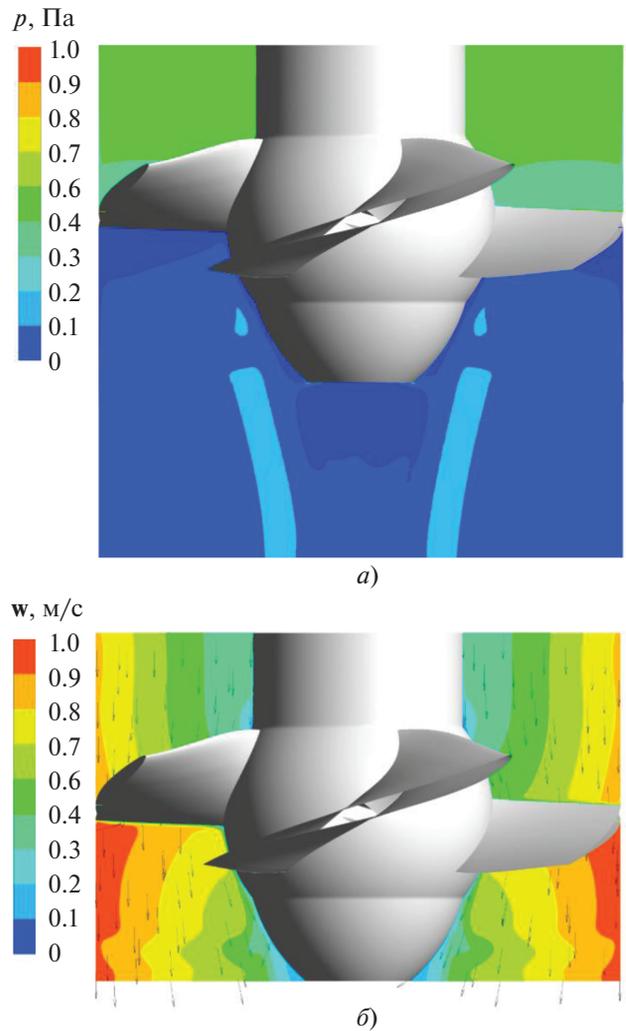
последующего слоя. Таким образом, количество ячеек для расчетной модели составило 11.243 млн для традиционного колеса и 11.191 млн для биологически безопасного.

#### *Постановка граничных условий*

В модуле ANSYS CFX после распределения доменов построенной сетки необходимо определить граничные условия для моделирования. В данной работе была задана модель турбулентности  $k-\epsilon$ . В качестве граничных условий было установлено абсолютное давление на входе  $p = 48$  кПа и статическое давление на выходе равное нулю, точность вычисления составила до  $10^{-5}$ .

#### *Результаты численного моделирования*

В процессе численного моделирования были построены распределения давлений и векторы



**Рис. 10.** Распределение давлений  $p$  (а) и векторы скорости  $w$  (б) в турбине, имеющей биобезопасную конструкцию

скоростей для колеса традиционной конструкции (рис. 9) и модифицированного, обеспечивающего биобезопасность при работе гидротурбины (рис. 10). Для сравнения полученных данных по давлению и скоростям была проведена нормализация их значений.

Параметры рабочих колес гидротурбин, установленные в результаты моделирования, сведены в таблицу. Как следует из таблицы, у колеса, имеющего биобезопасную конструкцию, несколько пониженные энергетические показатели. Наиболее вероятно, что увеличение срабатываемого напора вызвано сужением проточной части в результате применения более широкой сферической втулки. Тем не менее, снижение параметров оказалось не очень значительным, что позволяет рекомендовать использовать подобное решение в случае, когда сумма штрафов за негативное воздей-

Результаты расчета параметров рабочих колес гидротурбин

Параметр	Колесо	
	традиционное	биобезопасное
Угловая частота, рад/с	157	157
Напор, м	3.89	4.01
Расход, м <sup>3</sup> /с	0.129	0.122
Мощность, кВт	4.645	4.503
КПД, %	93.21	92.76

стве на биологическую среду превысит стоимость недовыработанной мощности.

Безусловно, конструкцию биологически безопасного колеса возможно в дальнейшем улучшить, применив различные методы повышения эффективности, в том числе природоподобные технологии.

## ВЫВОДЫ

1. Используя различные способы изменения конструкции гидравлических турбин, можно улучшить ситуацию в области биобезопасности объектов гидроэнергетики, снизить вероятность физического повреждения рыбы, попадающей в проточную часть турбин. Однако в известных на сегодняшний день работах уделяется недостаточно внимания влиянию подобных изменений на основные показатели энергоэффективности турбин.

2. При сравнении параметров, полученных при численном CFD-моделировании рабочих колес осевой гидротурбины, созданных по типовому проекту и с использованием биологически безопасной конструкции, было выявлено незначительное снижение мощности в последней.

3. Компенсировать потери вырабатываемой мощности можно благодаря различным модификациям гидротурбины, поэтому требуются дальнейшее изучение влияния на энергетические характеристики гидротурбин каждого отдельного элемента проточной части с внесенными изменениями для обеспечения биобезопасности и сведения их в целевую функцию для определения не только безопасной, но конкурентоспособной в энергетическом плане конструкции.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Информационный** обзор “Единая энергетическая система России”. АО “Системный оператор Единой энергетической системы”, 2022.
2. **Мировая** энергетика. Установленная мощность электростанций. EES EAEC. Taipei, Taiwan. At night. Averaged over March 2021. Night lights in Google Maps / The Earth Observation Group. <https://www.eeseaec.org/>
3. **Odeh M.** A summary of environmentally friendly turbine design concepts: Report. US Department of Energy; USGS Publications Warehouse, 1999.
4. **Computational** studies of hydraulic stressors for biological performance assessment in a hydropower plant with Kaplan turbine / R.K. Singh, P. Romero-Gomez, A. Colotelo, W.A. Perkins, M.C. Richmond // *Renewable Energy*. 2022. V. 199. P. 768–781. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.09.016>
5. **Improving** survival: injury and mortality of fish struck by blades with slanted, blunt leading edges / S.V. Amaral, S.M. Watson, A.D. Schneider, J. Rackovan, A. Baumgartner // *J. Ecohydraulics*. 2020. P. 175–183. <https://doi.org/10.1080/24705357.2020.1768166>
6. **De Romero-Gomez P.J.** Protecting fish and livelihoods. Fish-friendly assessment in practice // *Andritz Group. Hydronews Asia*. 2023. P. 34–35. <https://www.andritz.com/hydro-en/hydronews/hydro-news-asia/protecting-fish-and-livelihoods>
7. **Lee M.D., Lee P.S.** Modelling the energy extraction from low-velocity stream water by small scale Archimedes screw turbine // *J. King Saud University – Eng. Sci*. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2021.04.006>
8. **Gorlov B.A.** Helical turbine and fish safety // *Environ. Sci. Eng.* 2010. P. 1–14.
9. **Safe** passage for fish: The case for in-stream turbines / E. Brown, S. Sulaeman, R. Quispe-Abad, N. Müller, E. Moran // *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2023. V. 173. P. 113034. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113034>
10. **Proceedings** of the 1995 Turbine Passage Survival Workshop. Portland District, Portland, Oregon, 1995 / U.S. Army Corps of Engineers (USACE).
11. **Von Raben K.** Regarding the problem of mutilations of fish by hydraulic turbines // *Wasserwirtschaft*. 1957. No. 4. P. 97–100.
12. **Monten E.** Fish and turbines: fish injuries during passage through power station turbines. Publisher, Vattenfall, 1985.
13. **Bell M.C., Kidder J.C.** Revised compendium on the success of passage of small fish through turbines. Portland, Oregon, 1991. P. 83 / U.S. Army Corps of Engineers, North Pacific Division
14. **Experimental** studies relating to the passage of fish and shrimps through tidal power turbines / A.W.H. Turnpenny, M.H. Davis, J.M. Fleming, J.K. Davies // *Environ. Sci.* 1992.
15. **Lagler K.F., Bardach J.E., Miller R.R.** Ichthyology. The study of fishes. N.Y.: John Wiley and Sons, 1962.
16. **Tsvetkov V.I., Pavlov D.S., Nezdolij V.K.** Changes in hydrostatic pressure lethal to the young of some freshwater fish // *J. Ichthyology*. 1972. V. 12 P. 307–318.
17. **Muir J.F.** Passage of young fish through turbines // *J. Power Div.* 1959. V. 85. P. 23–46.
18. **Development** of biological criteria for the design of advanced hydropower turbines / G.F. Cada, C.C. Coutant, R.R. Whitney, L. Washington. Washington, DC, USA: EERE Publication and Product Library, 1997.

## Methods for Rendering Biosafety of Elements in Flow Paths of Hydraulic Turbines

A. V. Volkov<sup>a</sup>, V. Yu. Lyapin<sup>a</sup>, A. A. Druzhinin<sup>a</sup>, M. A. Biryulin<sup>a, \*</sup>,  
M. Tkach<sup>a</sup>, I. V. Kachanov<sup>b</sup>, and P. G. Ernandes<sup>c</sup>

<sup>a</sup> National Research University Moscow Power Engineering Institute (NRE MPEI), Moscow, 111250 Russia

<sup>b</sup> Belarusian National Technical University, Minsk, 220013 Republic of Belarus

<sup>c</sup> Empresa de Mantenimiento a Centrales Eléctricas,  
Unidad de Servicios Técnicos 100 y 69, Marianao, Cuba, 11500 Ciudad de la Habana

\*e-mail: biriulinma@mpei.ru

**Abstract**—Hydroelectric power belongs to renewable energy sources and contributes a considerable percentage of the electrical energy generated in the world. Its advantages include no carbon dioxide emission, excellent maneuverability, and high energy effectiveness. However, disadvantages do also exist caused by the influence of hydropower facilities on the bioenvironment. This paper presents a review of the most characteristic effects of elements of the flow path of hydroturbines during their operation on biofauna (fish and plankton). The most popular design solutions are examined, which are aimed at reducing the risk of negative impact of the elements of the flow path of hydraulic turbines on the bioenvironment. Obviously, the implementation of these solutions will deteriorate the performance of hydraulic turbines. However, we should bear in mind that the main purpose of these solutions is to ensure the biological safety of facilities, while their energy characteristics do not receive proper attention. The paper presents in some detail an option for rendering environmental safety, which is the modernization of the runner hub by eliminating the gaps between the blades and the hub. Numerical simulation has revealed that the application of a runner with the modified hub increases the hydraulic resistance, decreases the flowrate, and, as a result, reduces the generated power. An analysis of the simulation results has suggested that, despite some decrease in the energy characteristics, we should investigate in more detail and improve the biologically safe version of the hydraulic turbine flow path. In addition, a conclusion has been made that the flow path can be further modified to compensate for power losses.

*Keywords:* hydroturbines, biosafe hydroturbines, runner spherical hub, CFD-simulation, biological resources, pressure difference, cavitation