

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-2-175-188>

УДК 621.22-253

Оценка влияния изменения давления в проточной части на биологическую безопасность осевой гидротурбины при увеличении толщины лопасти рабочего колеса

М. А. Бирюлин¹⁾, А. В. Волков¹⁾, А. А. Дружинин¹⁾, В. Н. Шарий¹⁾,
И. В. Качанов²⁾, Г. М. Бровка²⁾

¹⁾Национальный исследовательский университет «МЭИ» (Москва, Российская Федерация),

²⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. Рассматриваются вопросы повышения экологической безопасности энергообъектов, в частности малых ГЭС, которые позволяют эффективно использовать местные энергоресурсы, в том числе для удаленных и автономных потребителей. С увеличением числа малых гидроэлектростанций в мире возникает потребность в обеспечении их биологической безопасности с целью снижения влияния на биосреду водоемов. В настоящее время предложен ряд технических решений, в частности для рабочих колес гидротурбин, позволяющих снизить возможные негативные последствия для экологии. Однако данные предложения в основном направлены на борьбу с физическим воздействием при столкновении с лопастью, а вопросы, связанные с энергоэффективностью и другими видами негативных воздействий, например баротравмы, остаются открытыми. В данной статье рассматривается влияние толщины лопасти на эффективность и биологическую безопасность при воздействии перепада давления. Для исследования было создано и испытано рабочее колесо осевой гидротурбины. С помощью CFD и методики BioPA определены зависимости выживаемости от различных толщин лопасти, получена зависимость КПД гидротурбины от выживаемости, рассчитанной по перепаду давлений, при различных толщинах лопасти. Полученные результаты показывают важность создания биологически безопасных рабочих колес гидротурбин с учетом различных показателей качества для получения как эффективных, так и безопасных решений.

Ключевые слова: гидравлические гидротурбины, биологически безопасные гидротурбины, CFD-моделирование, перепады давления

Для цитирования: Оценка влияния изменения давления в проточной части на биологическую безопасность осевой гидротурбины при увеличении толщины лопасти рабочего колеса / М. А. Бирюлин [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2025. Т. 68, № 2. С. 175–188. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-2-175-188>

Адрес для переписки

Качанов Игорь Владимирович
Белорусский национальный
технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 249-56-77
hidrokaf@bntu.by

Address for correspondence

Kachanov Igor V.
Belarusian National
Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 249-56-77
hidrokaf@bntu.by

Assessment of the Impact of Pressure Changes in the Flow Path on the Biological Safety of an Axial Hydraulic Turbine with Increasing Thickness of the Impeller Blade

М. А. Бирюлин¹⁾, А. В. Волков¹⁾, А. А. Дружинин¹⁾, В. Н. Шарий¹⁾,
И. В. Качанов²⁾, Г. М. Бровка²⁾

¹⁾NRU Moscow Power Engineering Institute (Moscow, Russian Federation),

²⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The issues of improving the environmental safety of energy facilities, in particular small hydroelectric power plants, which make it possible to effectively use local energy resources, including the ones for remote and autonomous consumers, are considered. With the increasing number of small hydroelectric power plants in the world, there is a need to ensure their biological safety in order to reduce the impact on the biological environment of reservoirs. Currently, a number of technical solutions are available, in particular for impellers of hydraulic turbines, which allow reducing possible negative consequences for the environment. However, these proposals are mainly aimed at combating the physical impact of a collision with the mouth, while matters related to energy efficiency and other types of negative impacts, such as barotrauma, remain open. The present article examines the effect of blade thickness on efficiency and biosafety when exposed to a pressure drop. The impeller of an axial hydraulic turbine was created and tested for the study. With the help of CFD and the BioPA technique, the dependences of survivability on different blade thicknesses were determined, and the dependence of the efficiency of a hydraulic turbine on survivability, calculated from the pressure drop, at different blade thicknesses was obtained. The obtained results show the importance of creating biologically safe impellers of hydraulic turbines, taking into account various quality indicators, in order to obtain both effective and safe solutions.

Keywords: hydroturbines, fish-friendly hydroturbines, CFD-simulation, pressure difference

For citation: Biriulin M. A., Volkov A. V., Druzhinin A. A., Shary V. N., Kachanov I. V., Brovka G. M. (2025) Assessment of the Impact of Pressure Changes in the Flow Path on the Biological Safety of an Axial Hydraulic Turbine with Increasing Thickness of the Impeller Blade. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (2), 175–188. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-2-175-188> (in Russian)

Введение

В результате активного гидротехнического строительства по всему миру появляется множество гидроэлектростанций различных мощностей. В настоящее время очень популярна малая гидроэнергетика благодаря низким капитальным затратам на строительство и возможности обеспечивать энергоснабжение в труднодоступных и изолированных районах. Для того чтобы не наносить вреда природе, который проявляется в ущербе рыбному хозяйству и снижении биологических процессов, связанных с самоочищением водных масс, требуется уделять большое внимание вопросам экологических последствий при эксплуатации ГЭС.

В настоящее время эксплуатирующие организации вынуждены оплачивать штрафы за урон, наносимый биосреде, а заводы – изготовители гидравлических турбин озабочены биобезопасностью при проектировании новых агрегатов. Над проблемами экологической безопасности активно работают во всем мире специалисты в области гидроэнергетики, в частности в США, Австрии, Германии, Китае, Индии и др. Поскольку на территориях РФ и Беларуси располагается множество каскадов ГЭС, возникает потребность в аналогичных собственных разработках, исследованиях и импортозамещающих технологиях, направленных на снижение негативного механического воздействия на биоресурсы рек.

Так, в работах [1, 2] рассматривался механизм травмирования рыб в проточной части гидротурбин, а также наиболее известные подходы для повышения биобезопасности. Среди них можно выделить подходы, касающиеся конструктивных изменений в рабочем колесе гидротурбины:

- устранение зазоров между лопастями и рабочим колесом;
- уменьшение количества лопастей;
- увеличение длины лопасти;
- увеличение толщины лопасти.

Также стоит отметить решение исследователей из Natal Enegy. Они дополнительно модифицировали лопасть, которая позволяет рыбам испытывать меньшее воздействие от удара на периферии лопасти [3].

Тем не менее все предложения направлены в первую очередь на борьбу с физическим воздействием при столкновении с лопастью, а вопросы, связанные с баротравмами, после внедрения предложенных решений остаются открытыми. Кроме того, любое вмешательство в отлаженные заводами-изготовителями методики проектирования рабочих колес приводит к изменению их КПД. К примеру, в статье [2] показано влияние изменения формы втулки рабочего колеса с целью устранения зазоров на энергоэффективность. Но то, как будет изменяться эффективность рабочих колес после реконструкции, до конца не изучено.

Одним из наиболее популярных методов повышения биобезопасности считается увеличение толщины лопасти, так как это значительно снижает травматизм рыб. В связи с этим в статье показано исследование влияния изменения толщины лопасти рабочего колеса осевой гидротурбины на эффективность и выживаемость при воздействии давления.

Механизм воздействия давления на рыб

На ГЭС в области от водовода до направляющего аппарата происходит повышение давления, которое впоследствии срабатывается на рабочем колесе гидротурбины. На рис. 1 можно видеть осциллограмму давления, снятую в работе [4].

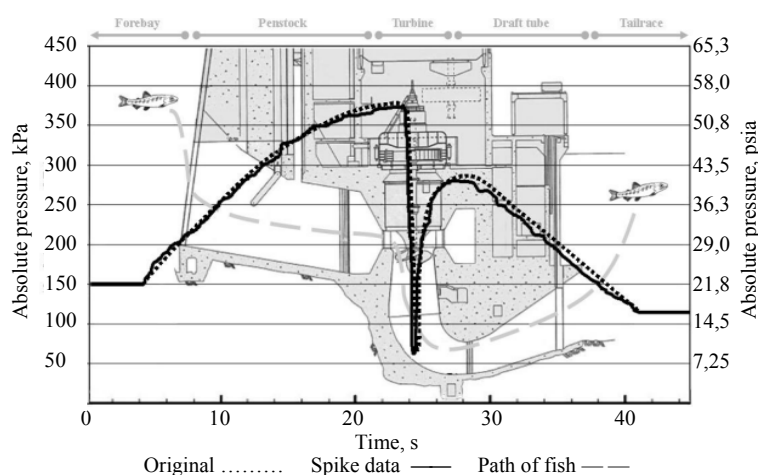


Рис. 1. Осциллограмма давления, снятая внутри проточной части гидроагрегата

Fig. 1. Pressure oscillogram taken inside the flow path of a hydraulic turbine

Таким образом, рыба может испытывать на себе перепад давления, который приведет к баротравме. В [4] отмечается, что важным значением, с точки зрения выживаемости рыбы, является минимальное давление, которое находится в районе 0,25 с, так как более ранние исследования [5, 6] установили, что повышение давления слабо влияет на плавательную способность управлять своим движением. Минимумы давления располагаются под лопастью гидротурбины или в вихревом жгуте, образующемся под втулкой турбины [7–12]. Кроме того, в случаях локального падения давления до уровня насыщенного пара может возникнуть более тяжелый случай баротравмы, вызываемой кавитацией. В результате данного явления образуются паровые полости (пузырьки), которые разрушаются в области с более высоким давлением. Схлопывание кавитационных пузырей часто вызывает шум, вибрацию, эрозионное повреждение твердых поверхностей, потерю эффективности [13–16]. Аналогичное воздействие оказывается и на рыбу, что приводит к физическим повреждениям тела [17].

Величина повреждений, вызываемых давлением, также зависит от скорости изменения давления и вида рыбы. Открытопузырные рыбы, такие как лосось и форель, имеют воздушный канал, соединяющий плавательный пузырь с пищеводом, который используется вместе со ртом для быстрого всасывания или выпуска газа [18], что позволяет быстро адаптироваться к изменению давления.

У закрытопузырных рыб, таких как окунь и бас, нет воздушного канала, и они должны регулировать содержание газов в своем организме с помощью диффузии в крови. Поскольку этот процесс может занимать несколько часов, эти рыбы более восприимчивы к повреждениям из-за быстрого снижения давления.

Методика оценки выживаемость рыб при воздействии давления

Оценить вероятность летальной травмы от баротравмы можно с помощью методики, описанной в статье [19].

На основе лабораторных исследований выведена эмпирическая зависимость вероятности летального ранения $P_{\text{лет}}$

$$P_{\text{лет}} = \frac{e^{-5,56+3,85 \cdot LRP_i}}{1 + e^{-5,56+3,85 \cdot LRP_i}}, \quad (1)$$

где LRP_i – натуральный логарифм коэффициента изменения давления.

Данный коэффициент рассчитывается по выражению

$$LRP_i = \ln \left(\frac{p_a}{p_{\min}} \right), \quad (2)$$

где p_a – давление, к которому приспособилась рыба до попадания в проточную часть; $p_{\min}$ – минимальное давление, возникающее в проточной части.

CFD-моделирование позволяет получить линии тока и определить минимальное давление, соответствующее каждой линии. С учетом вероятного попадания рыбы на каждую из полученных линий тока строится

гистограмма по ряду интервалов давления для расчета вероятности воздействия определенного $p_{\min}$ на рыбу.

Зависимости, описывающие вероятность воздействия определенного давления на рыбу и вероятность летального ранения, показаны на рис. 2. Заштрихованная площадь показывает ожидаемую вероятность летальной травмы в заданной рабочей точке гидротурбины.

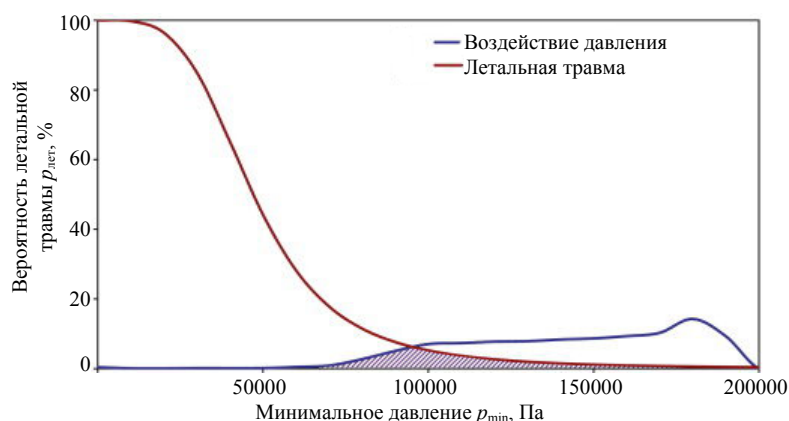


Рис. 2. Ожидаемая вероятность летальной травмы

Fig. 2. Expected mortal injury

Таким образом, общий риск летальной травмы во время прохождения через проточную часть возможно оценить с помощью показателя эффективности β

$$\beta = \left(\sum_{i=1}^N P_{\text{лет},i} \cdot P(p_{\min})_i \right) \cdot 100 \%. \quad (3)$$

Расчетные и экспериментальные исследования

Для анализа влияния геометрических параметров проточной части на биосреду были созданы рабочие колеса в исходном и модифицированном состояниях. Анализ вероятной летальности рыб осуществлялся по методике [19]. Исходное рабочее колесо осевой гидротурбины было спроектировано на параметры, которые представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры рабочего колеса
Impeller parametrs

Параметр Parameter	Значение Value	Ед. units
1	2	3
Номинальный диаметр D_1 Nominal diameter D_1	0,200	м m
Втулочное отношение (0,3–0,6) Hub ratio (0,3–0,6)	0,450	

Окончание табл. 1
Ending Tabl. 1

1	2	3
Расход Q Flowrate Q	0,130	$\text{м}^3/\text{с}$ m^3/s
Напор H Head H	4,000	m
Частота вращения n Rotation speed n	1500,000	rev/min
Число лопастей Z Number of blades Z	4,000	шт./ units
Диаметр втулки $d_{\text{вт}}$ Hub diameter $d_{\text{вт}}$	0,090	м m
Гидравлический КПД Hydraulic efficiency	0,920	
Густота решетки на средней поверхности тока L/t Lattice density on the middle flowpath L/t	1,0	

После подготовки CAD-модели рабочего колеса она была импортирована в программный пакет FlowVision в формате STL для проведения численного эксперимента. Импортированная геометрия продемонстрирована на рис. 3.

Для расчетной области в качестве граничных условий задавалось полное давление на входе $p_1 = 50$ кПа и расход на выходе $Q = 0,13$ $\text{м}^3/\text{с}$. Турбулентное течение рабочей среды моделировалось с использованием $k-\epsilon$ модели турбулентности. В табл. 2 показано исследование сеточной сходимости.

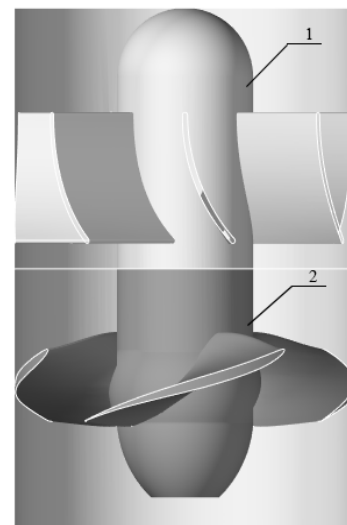


Рис. 3. Отображение модели рабочего колеса в программе FlowVision: 1 – направляющий аппарат, обеспечивающий нужную циркуляцию; 2 – рабочее колесо

Fig. 3. Impeller model in the FlowVision program: 1 – guide vane, providing the necessary circulation; 2 – runner

Как видно из табл. 2, с ростом количества ячеек в определенный момент разница моментов исчезает, дальнейшее дробление сетки не меняет эффект. Таким образом, в качестве принятого значения был выбран вариант 3. Общее количество элементов в построенной расчетной сетке составило 1,96 млн.

На рис. 4 показан поперечный разрез расчетной сетки, на котором продемонстрирован размер ячеек и локальное сгущение сеточных слоев у стенок.

Исследование сеточной независимости
Mesh sensitivity test

Вар. Var.	Характерный размер орта, мм Characteristic unit size, mm	Ячейки, ед. Cells, units	Ячейки с учетом адаптации, ед. Cells taking into account adaptation, units	Момент на лопастях РК, Н · м The torque on the runner blades, N · m
1	4	208877	463744	22,57
2	3	505296	760163	27,33
3	2	1705374	1960241	30,98
4	1,5	2122600	2377467	31,05

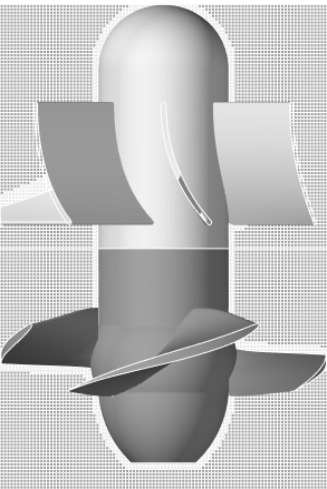


Рис. 4. Разрез расчетной сетки
Fig. 4. Section
of the computational mesh

На рис. 5 представлены контуры распределения давления и скоростей для оптимальной точки работы турбины.

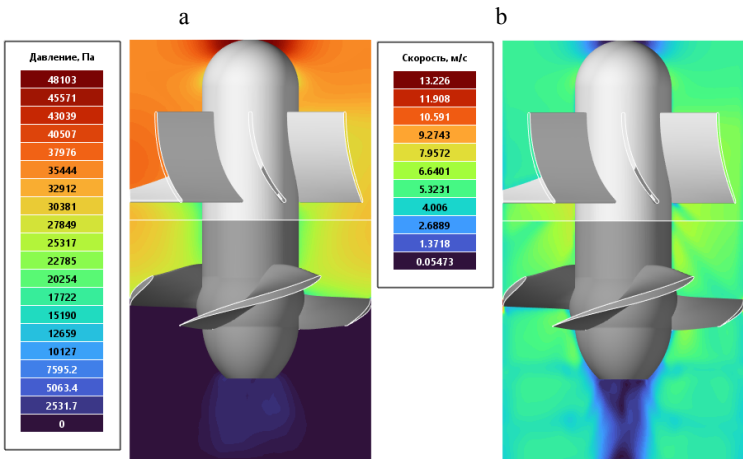


Рис. 5. Результаты расчета рабочего колеса:
а – контур давлений; б – то же скоростей для оптимальной точки работы турбины
Fig. 5. Calculation results related to the impeller. Distribution of pressure (a)
and velocity (b) for the energetically optimal operating point

Для верификации расчетных исследований был проведен физический эксперимент на модернизированном энергокавитационном стенде микрогидротурбин кафедры ГТМ НИУ «МЭИ». Принципиальная схема стенда приведена на рис. 6.

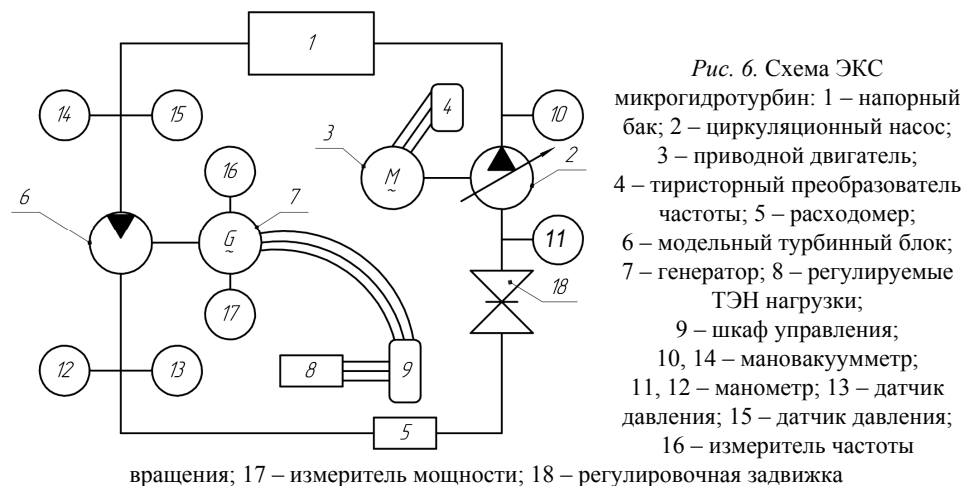


Fig. 6. The scheme of an energy cavitation stand for micro-hydoturbines:
1 – tank; 2 – circulation pump; 3 – drive motor; 4 – thyristor frequency converter; 5 – flow meter; 6 – model turbine block; 7 – generator; 8 – adjustable heating elements loads; 9 – control cabinet; 10, 14 – pressure and vacuum gauge; 11, 12 – pressure gauge; 13 – pressure sensor; 15 – pressure sensor; 16 – rotation speed meter; 17 – power meter, 18 – adjusting valve

Визуализация полученных в ходе физического эксперимента результатов показана на рис. 7, 8.

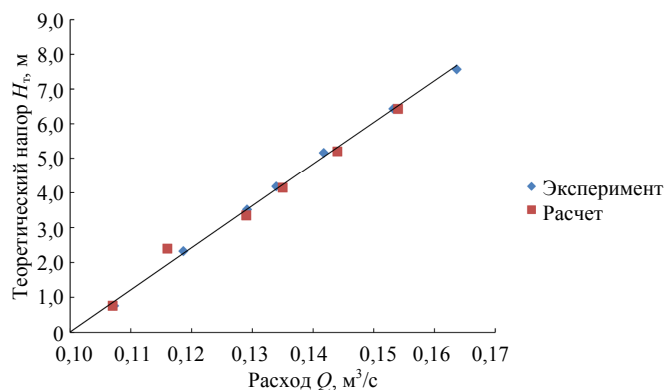


Рис. 7. Зависимости теоретического напора от расхода при расчете и эксперименте

Fig. 7. Curves of theoretical pressure on flow rate in CFD and field experiments

Получение зависимости теоретического напора от расхода в виде линейной зависимости показывает (рис. 7), что условия проведения и обработки результатов эксперимента соответствуют нормам. Сравнение результатов эксперимента и расчета (рис. 8) показывает хорошую сходимость, что позволяет сделать выводы о правомерности использования рас-

пределения скоростей и давлений в проточной части гидротурбин, полученных в расчете для прогнозирования траектории движения биосреды (будет представлено ниже). Таким образом, можно считать, что рассчитанные вероятности получения травм рыбами при прохождении через гидротурбину соответствуют действительности.

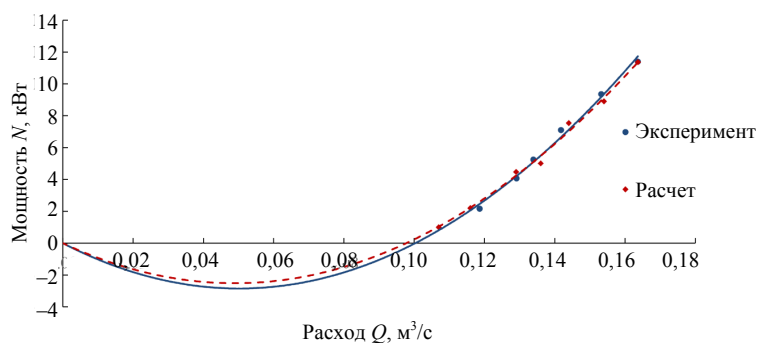


Рис. 8. Зависимости мощности от расхода при расчете и эксперименте

Fig. 8. Curves of power on flow rate in CFD and field experiments

Влияние изменения толщины на эффективность и биобезопасность

Для дальнейших расчетов толщина рабочего колеса была увеличена в 2 и в 3 раза по сравнению с первоначальной.

На основании численного эксперимента получен набор энергетических характеристик и вероятностей выживаемости для лопастных систем различной толщины. Данные сведены на общие диаграммы (рис. 9–11).

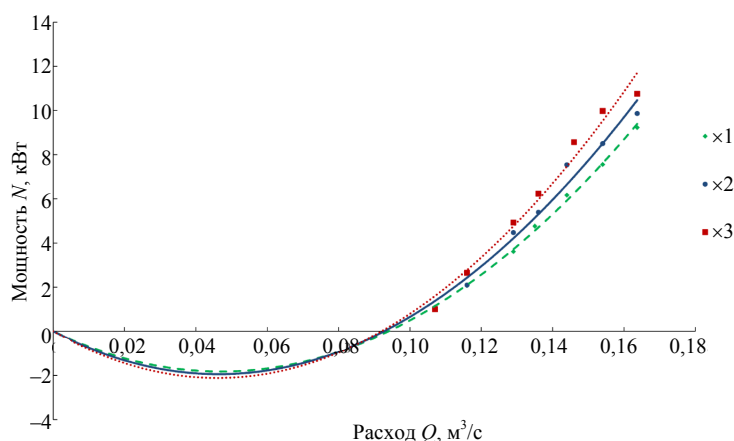


Рис. 9. Зависимости мощности от расхода для трех различных вариантов толщин лопасти

Fig. 9. Dependence of power on flow rate for three different blade thicknesses

Из анализа рис. 9–11 видно, что при увеличении толщины лопасти возрастают мощность и биобезопасность, при этом сокращается рабочая об-

ласть турбины и снижается ее КПД. В связи с этим зависимость показателей эффективности – биобезопасность принимает следующий вид (рис. 12).

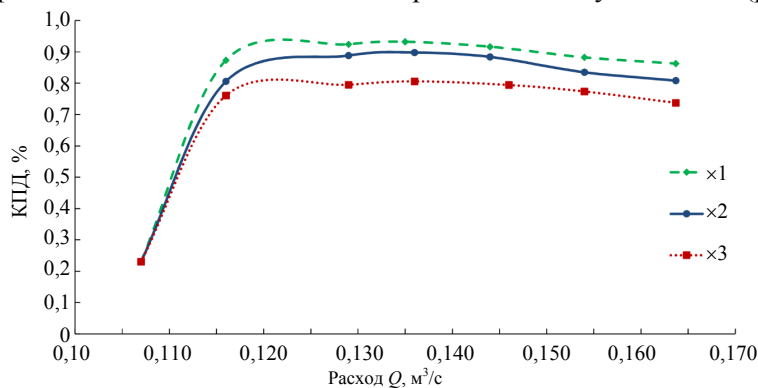


Рис. 10. Зависимости КПД от расхода для трех различных вариантов толщин лопасти

Fig. 10. Dependence of efficiency on flow rate for three different blade thicknesses

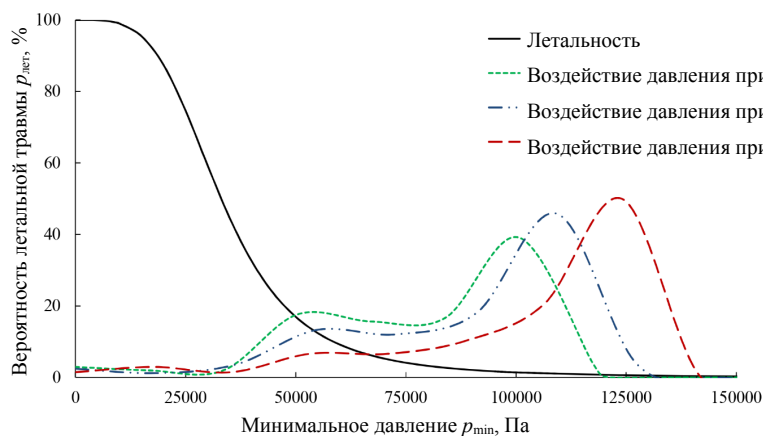


Рис. 11. Вероятность летального исхода для трех различных вариантов толщин лопасти

Fig. 11. Fatal outcome probabilities for three different blade thicknesses

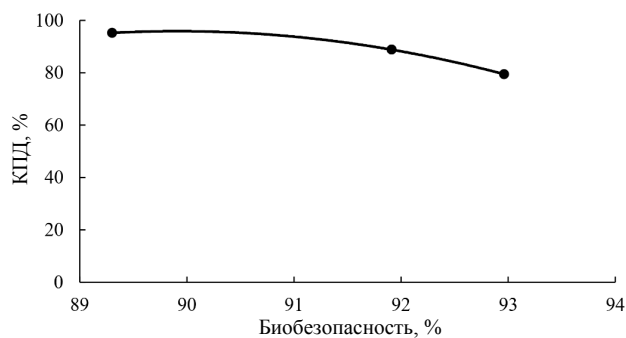


Рис. 12. Зависимость КПД гидротурбины от выживаемости, рассчитанной по перепаду давлений, при различных толщинах лопасти

Fig. 12. Dependence of the efficiency of a hydraulic turbine on the survival rate calculated from the pressure drop at different blade thicknesses

ВЫВОДЫ

1. Ряд исследований, например [3, 20], показывает, что изменение толщины лопасти рабочих колес гидротурбины приводит к повышению выживаемости рыб, так как позволяет рыбам испытывать меньшее воздействие от удара о лопасти. При этом если количество лопастей осталось прежним, происходит стеснение потока, изменяется вырабатываемая мощность и точка с оптимальным КПД смещается. Согласно рис. 11, при обеспечении высокого показателя выживаемости происходит значительное снижение КПД, следовательно, при использовании данного метода целесообразно рассматривать диапазон проектных параметров, при которых минимальны снижение КПД и повышение биобезопасности. Также стоит отметить, что исследования проводились на осесимметричных профилях. Применение асимметричного профиля в дальнейших исследованиях может значительно изменить вид полученной зависимости.

2. Дополнительно следует отметить, что оценка биобезопасности должна учитывать интегральный эффект нескольких негативных воздействий для более реалистичного определения вероятности летального исхода, что позволит достичь максимальной выживаемости рыб еще на этапе проектирования будущих рабочих колес гидротурбин. Перспективно осуществить на основе многокритериальной задачи с использованием нейронных сетей исследования по созданию проточных частей гидротурбин с учетом максимально возможного количества показателей качества и ограничений.

Результаты получены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения Государственного задания № FSWF-2022-0008, вступившего в силу в соответствии с Соглашением № 075-03-2022-138/5 от 02.11.2022.

ЛИТЕРАТУРА

1. Koukouvini, Ph. F. State of the Art in Designing Fish-Friendly Turbines: Concepts and Performance Indicators / Ph. F. Koukouvini, J. Anagnostopoulos // *Energies*. 2023. Vol. 16, No 6. P. 2661. <https://doi.org/10.3390/en16062661>.
2. Методы обеспечения биобезопасности элементов проточных частей гидротурбин / А. В. Волков, В. Ю. Ляпин, А. А. Дружинин [и др.] // *Теплоэнергетика*. 2023. № 11. С. 107–114. <https://doi.org/10.56304/S0040363623110127>.
3. Improving Survival: Injury and Mortality of Fish Struck by Blades with Slanted, Blunt Leading Edges / S. V. Amaral, S. M. Watson, A. D. Schneider [et al.] // *Ecohydraulics*. 2020. Vol. 5. P. 175–183. <https://doi.org/10.1080/24705357.2020.1768166>.
4. Assessing Barotrauma in Neutrally and Negatively Buoyant Juvenile Salmonids Exposed to Simulated Hydro-Turbine Passage Using a Mobile Aquatic Barotrauma Laboratory / J. Stephenson, A. J. Gingerich, R. S. Brown [et al.] // *Fish. Res.* 2010. Vol. 106, No 3. P. 271–278. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2010.08.006>.

5. Lampert, W. Experiments on the Resistance of Fish to Rapid Increase in Hydrostatic Pressure / W. Lampert // *Journal of Fish Biology*. 1976. Vol. 8, No 5. P. 381–383. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1976.tb03966.x>.
6. Foye, R. E. Effects of Pressure on Survival of Six Species of Fish / R. E. Foye, M. Scott // *Transactions of the American Fisheries Society*. 1965. Vol. 94, No 1. P. 88–91. [https://doi.org/10.1577/1548-8659\(1965\)94\[88:eoposo\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(1965)94[88:eoposo]2.0.co;2).
7. Guo, T. Analysis of Channel Vortex and Cavitation Performance of the Francis Turbine under Partial Flow Conditions / T. Guo, J. Zhang, Z. Luo // *Processes*. 2021. Vol. 9, No 8. P. 1385. <https://doi.org/10.3390/pr9081385>.
8. Kumar, P. Study of Cavitation in Hydro Turbines – A Review / P. Kumar, R. P. Saini // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010. Vol. 14, No 1. P. 374–383. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.024>.
9. Research on the Vortex Rope Control Techniques in Draft Tube of Francis Turbines / L. Wang, J. Cui, L. Shu [et al.] // *Energies*. 2022. Vol. 15, No 24. P. 9280. <https://doi.org/10.3390/en15249280>.
10. Prediction of Cavitation and Its Mitigation Techniques in Hydraulic Turbines – A Review / Brijkishore, R. Khare, V. Prasad // *Ocean Engineering*. 2021. Vol. 221. P. 108512. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108512>.
11. Оптимизация работы водозаборов подземных вод с помощью двухколонных скважин / В. В. Ивашечкин, Ю. А. Медведева // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2022. Т. 65, № 5. С. 451–462. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-5-451-462>.
12. Методика гидравлического расчета групповых скважинных водозаборов с парными сборными водоводами / В. В. Верemenюк, В. В. Ивашечкин, В. И. Крицкая // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 3. С. 268–280. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-3-268-280>.
13. Odeh, M. M. A Computer Expert System for the Analysis and Design of Cavitating Control Valves: Ph.D. Dissertation / M. M. Odeh. Logan, Utah, 1988. 127 p.
14. Tullis, J. P. Fundamentals of Cavitation / J. P. Tullis // *Hydraulics of Pipelines – Pumps, Valves, Cavitation, Transients* / J. P. Tullis. New York John Wiley & Sons, Inc., 1989. Chapter 5. P. 119–133.
15. Математические модели скважинных водозаборов с разветвленной и кольцевой схемами соединения сборных водоводов / В. В. Верemenюк, В. В. Ивашечкин, В. В. Крицкая // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 6. С. 563–580. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-563-580>.
16. Моделирование работы скважинного водозабора подземных вод с кольцевым сборным водоводом / В. В. Верemenюк, В. В. Ивашечкин, В. И. Крицкая // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 66, № 3. С. 289–300. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-3-289-300>.
17. An Experimental Study of Cavitation Damage on Tissue of *Carassius Auratus* in a Jet Fish Pump / X. Long, M. Xu, J. Wang [et al.] // *Ocean Engineering*. 2019. Vol. 174. P. 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.01.052>.
18. Development of Biological Criteria for the Design of Advanced Hydropower Turbines / Glenn F. Cada, Charles C. Coutant. Idaho: US Department of Energy, 1997. URL: <https://www1.eere.energy.gov/wind/pdfs/doewater-10578.pdf>.
19. Quantifying Barotrauma Risk to Juvenile Fish During Hydro-Turbine Passage / M. C. Richmond, J. A. Serkowski, L. L. Ebner [et al.] // *Fisheries Research*. 2014. Vol. 154. P. 152–164. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2014.01.007>.

20. Mortality and Injury Assessment for Three Species of Fish Exposed to Simulated Turbine Blade Strike / M. Bevelhimer, B. M. Pracheil, A. M. Fortner [et al.] // Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 2019. Vol. 76, No 12. P. 152–164. <http://doi.org/10.1139/cjfas-2018-0386>.

Поступила 19.08.2024 Подписана в печать 23.10.2024 Опубликовано онлайн 31.03.2025

REFERENCES

1. Koukouvini Ph. F., Anagnostopoulos J. (2023) State of the Art in Designing Fish-Friendly Turbines: Concepts and Performance Indicators. *Energies*, 16 (6), 2661. <https://doi.org/10.3390/en16062661>.
2. Volkov A. V., Lyapin V. Yu., Druzhinin A. A., Biryulin M. A., Tkach M., Kachanov I. V., Ernanandes P. G. (2023) Methods for Rendering Biosafety of Elements in Flow Paths of Hydraulic Turbines. *Thermal Engineering*, (11), 932–938. <https://doi.org/10.1134/S0040601523110125>.
3. Amaral S. V., Watson S. M., Schneider A. D., Rackovan J., Baumgartner A. (2020). Improving Survival: Injury and Mortality of fish Struck by Blades with Slanted, Blunt Leading Edges. *Journal of Ecohydraulics*, 5 (2), 175–183. <https://doi.org/10.1080/24705357.2020.1768166>.
4. Stephenson J. R., Gingerich A. J., Brown R. S., Pflugrath B. D., Deng Z., Carlson Th. J., Langeslay M. J., Ahmann M. L., Johnson R. L., Seaburg A. G. (2010) Assessing Barotrauma in Neutrally and Negatively Buoyant Juvenile Salmonids Exposed to Simulated Hydro-Turbine Passage Using a Mobile Aquatic Barotrauma Laboratory. *Fisheries Research*, 106 (3), 271–278. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2010.08.006>.
5. Lampert W. (1976) Experiments on the Resistance of Fish to Rapid Increase in Hydrostatic Pressure. *Journal of Fish Biolog*, 8 (5), 381–383. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1976.tb03966.x>.
6. Foye R. E., Scott M. (1965) Effects of Pressure on Survival of Six Species of Fish. *Transactions of the American Fisheries Society*, 94 (1), 88–91. [https://doi.org/10.1577/1548-8659\(1965\)94\[88:eoposo\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(1965)94[88:eoposo]2.0.co;2).
7. Guo T., Zhang J., Luo Z. (2021) Analysis of Channel Vortex and Cavitation Performance of the Francis Turbine under Partial Flow Conditions. *Processes*, 9 (8), 1385. <https://doi.org/10.3390/pr9081385>.
8. Kumar P., Saini R. P. (2010) Study of Cavitation in Hydro Turbines – A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (1), 374–383. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.024>.
9. Wang L., Cui J., Shu L., Jiang D., Hiang Ch., Li L., Zhou P. (2022) Research on the Vortex Rope Control Techniques in Draft Tube of Francis Turbines. *Energies*, 15 (24), 9280. <https://doi.org/10.3390/en15249280>.
10. Brijkishore, K. R., Prasad V. (2021) Prediction of Cavitation and Its Mitigation Techniques in Hydraulic Turbines—A Review. *Ocean Engineering*, Vol. 221, 108512. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108512>.
11. Ivashechkin V. V., Medvedeva J. A. (2022) Optimization of the Operation of Groundwater Intakes Using Two-Column Wells. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 65 (5), 451–462. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-5-451-462> (in Russian).
12. Veremenyuk V. V., Ivashechkin V. V., Krytskaya V. I. (2024) Hydraulic Calculation Methodology for Group Well Water Intakes with Paired Prefabricated Water Pipelines. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 67 (3), 268–280. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-3-268-280> (in Russian).

13. Odeh M. M. (1998) *A Computer Expert System for the Analysis and Design of Cavitating Control* [Dissertation]. Utah State University – Logan, Utah. 127.
14. Tullis J. P. (1989) Fundamentals of Cavitation. *Hydraulics of Pipelines – Pumps, Valves, Cavitation, Transients*. New York, John Wiley & Sons, Inc., 119–132.
15. Veremenyuk V. V., Ivashechkin V. V., Krytskaya V. I. (2020) The Borehole Water Intakes Mathematical Models with a Branched and Circular Connection Schemes for Prefabricated Water Conduits. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (6), 563–580. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-563-580> (in Russian).
16. Veremenyuk V. V., Ivashechkin V. V., Krytskaya V. I. (2023) Simulation of the Operation of a Borehole Groundwater Intake with an Annular Prefabricated Conduit. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 66 (3), 289–300. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-3-289-300> (in Russian).
17. Long X., Xu M., Wang J., Zou J., Ji B. (2019) An Experimental Study of Cavitation Damage on Tissue of *Carassius Auratus* in a Jet Fish Pump. *Ocean Engineering*, 174, 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.01.052>.
18. Čada G.F., Coutant Ch. C., Whitney R.R. (1997) *Development of Biological Criteria for the Design of Advanced Hydropower Turbines*. Idaho, US Department of Energy. Available at: <https://www1.eere.energy.gov/wind/pdfs/doewater-10578.pdf>.
19. Richmond M. C., Serkowski J. A., Ebner L. L., Sick M., Brown R. S., Carlson T. J. (2014) Quantifying Barotrauma Risk to Juvenile Fish during Hydro-Turbine Passage. *Fisheries Research*, 154, 152–164. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2014.01.007>.
20. Bevelhimer M., Pracheil B. M., Fortner A. M., Saylor R., Deck K. L. (2019) Mortality and Injury Assessment for Three Species of Fish Exposed to Simulated Turbine Blade Strike. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 76 (12), 2350–2363. <http://doi.org/10.1139/cjfas-2018-0386>.