

SIMULATION OF ENERGY LOSSES IN AN INFLOW TURBINE WITH PARTIAL BLADING OF THE RUNNER

A. A. Kryukov¹, S. V. Kulichkov², A. A. Ratnikov²

¹ — Far Eastern State Technical Fisheries University, Vladivostok, Russian Federation

² — Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

Studying the coefficients of kinetic energy losses of the nozzle diaphragm and the runner in an inflow turbine with partial blading of the runner is carried out. It is noted that inflow low-consumption turbines are reliable and productive devices designed to drive various units. Due to their compact size, they are especially in demand in various branches of mechanical engineering. However, in order to increase efficiency and reduce production costs, it is necessary to constantly improve the technology of manufacturing turbine stages. Some inflow turbines are partial, which leads to additional energy losses. Partial stages in which there are no losses from ventilation, namely, turbines with partial flapping of the runner are considered. To simulate such turbines, the ANSYS CFX software package is used in the work. By using ANSYS Design Modeler to create a geometric model and determine boundary conditions, as well as selecting the appropriate grid, the dependences of the loss coefficients in the nozzle and the runner are obtained. The study has shown that the degree of partiality and the Mach number of the turbine stage have a significant impact on the losses coefficients in the exact part of the nozzle and the runner. To account for these dependencies in the modeling process, empirical dependencies, which are an integral part of the design process of inflow turbines, are obtained. The use of the obtained empirical dependencies makes it possible to more accurately predict the characteristics and performance of turbines of this type, as well as to supplement the existing mathematical model of the flow in the flow part of a low-consumption inflow turbine with partial blading of the runner.

Keywords: nozzle diaphragm, losses coefficient, runner, kinetic energy, numerical method, experiment, calculation grid, gas dynamics, low-consumption turbine.

For citation:

Kryukov, Aleksey A., Sergei V. Kulichkov, and Alexander A. Ratnikov. "Simulation of energy losses in an inflow turbine with partial blading of the runner." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.5 (2023): 858–866. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-858-866.

УДК 621.515.001.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В ЦЕНТРОСТРЕМИТЕЛЬНОЙ ТУРБИНЕ С ЧАСТИЧНЫМ ОБЛОПАЧИВАНИЕМ РАБОЧЕГО КОЛЕСА

А. А. Крюков¹, С. В. Куличков², А. А. Ратников²

¹ — ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет», г. Владивосток, Российская Федерация

² — ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет»,
г. Владивосток, Российская Федерация

В работе выполнено исследование коэффициентов потерь кинетической энергии соплового аппарата и рабочего колеса в центростремительной турбинной ступени с частичным облопачиванием рабочего колеса. Отмечается, что центростремительные малорасходные турбины являются надежными и производительными устройствами, предназначенными для привода различных агрегатов. Благодаря компактным размерам они особенно востребованы в различных отраслях машиностроения. Однако для повышения эффективности и снижения затрат на производство необходимо постоянное совершенствование технологии изготовления ступеней турбин. Часть центростремительных турбин являются парциальными, что приводит к дополнительным потерям энергии. Рассмотрены парциальные ступени, в которых отсутствуют потери от вентиляции, — турбины с частичным облопачиванием рабочего колеса. Для моделирования таких турбин в работе использован программный пакет ANSYS CFX. Путем использования ANSYS Design Modeler

для создания геометрической модели и определения граничных условий, а также выбора соответствующей сетки были получены зависимости коэффициентов потерь в сопловом аппарате и рабочем колесе. Исследование показало, что степень парциальности и число Маха ступени турбины оказывают существенное влияние на коэффициенты потерь в проточной части соплового аппарата и рабочего колеса. Для учета этих зависимостей в процессе моделирования получены эмпирические зависимости, являющиеся неотъемлемой частью процесса проектирования центробежных турбин. Использование полученных эмпирических зависимостей позволяет более точно прогнозировать характеристики и производительность турбин данного типа, а также дополнить существующую математическую модель течения потока в проточной части малорасходной центробежной турбины с частичным облопачиванием рабочего колеса.

Ключевые слова: сопловой аппарат, коэффициент потерь, рабочее колесо, численный метод, расчетная сетка, газодинамика, малорасходная турбина.

Для цитирования:

Крюков А. А. Моделирование потерь энергии в центробежной турбине с частичным облопачиванием рабочего колеса / А. А. Крюков, С. В. Куличков, А. А. Ратников // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 5. — С. 858–866. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-5-858-866.

Введение (Introduction)

Развитие мирового водного транспорта направлено на повышение безопасности, экологичности и энергоэффективности грузоперевозок. В связи с этим одной из ключевых задач является поиск методов улучшения эффективности корабельных энергетических комплексов [1], [2]. Внедрение устройств утилизации сбросной теплоты, таких как утилизационные котлы и турбогенераторы в судовых силовых установках, может оказать положительное влияние на экономические и экологические показатели этих систем [3]. С развитием подводной техники для освоения Мирового океана возникает потребность в энергонезависимых и компактных устройствах. В этом случае особую актуальность приобретают малорасходные турбины [4], так как они обеспечивают надежное энергоснабжение подводных аппаратов, выполняющих задачи по поиску, исследованию и добыче полезных ископаемых, биоресурсов и изучению живой природы. Один из способов повышения эффективности судовых энергетических систем заключается в совершенствовании устройств, утилизирующих энергию отработавших газов.

Развитие эффективных судовых энергетических установок является важным шагом в направлении модернизации водного транспорта. Использование энергетических ресурсов с помощью утилизационных котлов и турбогенераторов в судовых системах позволяет достичь более высоких показателей эффективности и экологической безопасности. Малорасходные турбины являются одной из наиболее важных инноваций в области энергетики. Исследования в этой области активно ведутся как в России, так и за рубежом. Научные работы, опубликованные в российских [5], [6] и иностранных [7]–[9] научных изданиях, посвящены изучению перетекания потока газообразной среды и применению численных методов в этой области.

Одним из ключевых факторов, определяющих эффективность малорасходных турбин, является их способность эффективно использовать энергию газообразной среды. Численные методы позволяют исследовать и оптимизировать процессы перетекания потока газа внутри турбины, что помогает повысить ее эффективность. Вместе с тем исследования в области малорасходных турбин не ограничиваются только энергетикой. Такие турбины находят применение в газотурбинных двигателях, используемых в авиации, на флоте, а также в других отраслях промышленности. Исследования в этой области могут привести к созданию более эффективных и экологически чистых технологий.

Исследования малорасходных турбин с применением численных методов представляют собой важную область научно-технического прогресса. Работы, опубликованные в российских и иностранных научных изданиях, позволяют расширить знания в этой области и сделать шаг вперед в разработке более эффективных и экологически чистых технологий. При установившемся режиме течения рабочего тела в проточной части турбинной ступени коэффициент профильных потерь является функцией следующих критериев:

$$\zeta_{\text{пр}} = f\left(\alpha_0, M, \text{Re}, E, \alpha_{0p}, \alpha_{1p}, \frac{t}{b}, \frac{b}{r_1}, \alpha_{\text{уст}}, \frac{d_0}{\alpha_0}, \frac{d_1}{\alpha_1}\right). \quad (1)$$

В упрощенном виде данную функцию можно представить в виде

$$\zeta_{\text{пр}} = \zeta_{\text{тр}} + \zeta_{\text{кр}} + \Delta\zeta(M) + \Delta\zeta(\text{Re}) + \Delta\zeta(i). \quad (2)$$

Коэффициент $\Delta\zeta(M)$ учитывает влияние числа Маха на профильные потери в проточной части соплового аппарата и рабочего колеса. Так как проведение физических экспериментов с малорасходными турбинами сопряжено с объективными проблемами, замена физического эксперимента численным позволяет получить математические зависимости, которые могут отражать влияние коэффициента $\Delta\zeta(M)$ на общие профильные потери.

Целью исследования является определение зависимости потерь кинетической энергии потока в каналах соплового аппарата и рабочего колеса центростремительной турбины с частичным облопачиванием рабочего колеса от степени парциальности и числа Маха.

Задачи исследования:

- определение коэффициентов потерь в сопловом аппарате и рабочем колесе на основе проведенных ранее экспериментов в данной области [10]–[12];
- определение зависимости потерь кинетической энергии от парциальности и числа Маха и аппроксимация значений коэффициентов потерь в сопловом аппарате и рабочем колесе турбины ступени.

Методы и материалы (Methods and Materials)

В работах [10]–[12], выполненных на базе Лаборатории компьютерного моделирования Отделения машиностроения и морской техники и транспорта Инженерного департамента Политехнического института (Школы ДВФУ), исследованы модели, в которых коэффициенты скорости соплового аппарата (СА) и рабочего колеса (РК) были определены в ходе эксперимента на имитационном стенде с использованием программного обеспечения ANSYS Workbench 17, установленного на моноблоках Lenovo Intel(R) Core (TM) i3–4160T CPU @ 3.10 GHz / 8 Гб ОЗУ с операционной системой Windows 10 × 64. С помощью CAD-моделирования были построены геометрические модели ступеней с различной степенью парциальности. На рис. 1 показаны эти ступени, расположенные в порядке увеличения степени парциальности начиная с $\varepsilon = 0,059$ (одна рабочая лопатка с двумя рабочими каналами) и заканчивая полноподводной турбиной $\varepsilon = 1,000$ (с полным облопачиванием рабочего колеса).

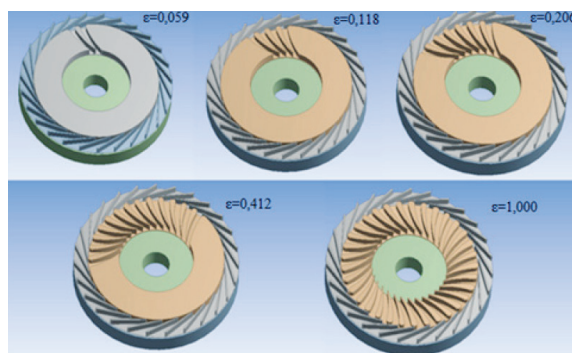


Рис. 1. Трехмерные модели турбинных ступеней

Для достижения точных результатов необходимо иметь надежную расчетную сетку. В этой статье рассматривается процесс создания расчетной сетки с использованием сеткогенератора ANSYS Meshing и ее применение в моделировании турбинных ступеней. Данный инструментальный позволяет создавать качественные расчетные сетки для сложных геометрических моделей. Он оснащен большим набором инструментов, дающих возможность оптимизировать сетку под конкретные требования и условия задачи.

При создании расчетной сетки для моделирования турбинной ступени необходимо соблюдение следующих основных условий: во-первых, сетка должна быть достаточно плотной ввиду основных особенностей геометрии и потока; во-вторых, необходимо учитывать граничные условия, такие как параметры торможения, рабочее тело, параметры на выходе и частота вращения, которые должны быть выбраны на основе ранее проведенных исследований и требований конкретной задачи.

ANSYS Meshing предоставляет возможность создания качественных сеток с учетом этих особенностей. Одним из преимуществ его использования является способность к автоматизации процесса создания расчетной сетки, который позволяет оптимизировать сетку с учетом заданных критериев качества и требований к точности расчетов. Это позволяет существенно сократить время, затрачиваемое на создание сетки, и повысить ее качество. После создания расчетной сетки можно приступить к проведению газодинамических расчетов.

Полученные данные позволяют более точно оценить характеристики потока в турбинной ступени, такие как распределение давления, температуры и скорости, что, в свою очередь, позволит улучшить производительность и эффективность турбинной ступени, а также оптимизировать ее конструкцию.

Результаты (Results)

В работе [11] проведены исследования, направленные на определение значений коэффициента φ (коэффициента скорости СА) и ψ (коэффициента скорости РК). Для определения значений коэффициентов потерь в СА и РК использованы следующие формулы:

– коэффициент потерь в СА:

$$\zeta_{CA} = 1 - \varphi^2. \quad (3)$$

– коэффициент потерь в РК:

$$\zeta_{PK} = 1 - \psi^2. \quad (4)$$

На рис. 2 представлены зависимости коэффициентов потерь в СА для ступени с частичным облопачиванием РК в диапазоне изменения степени парциальности от 0,059 до 1,00.

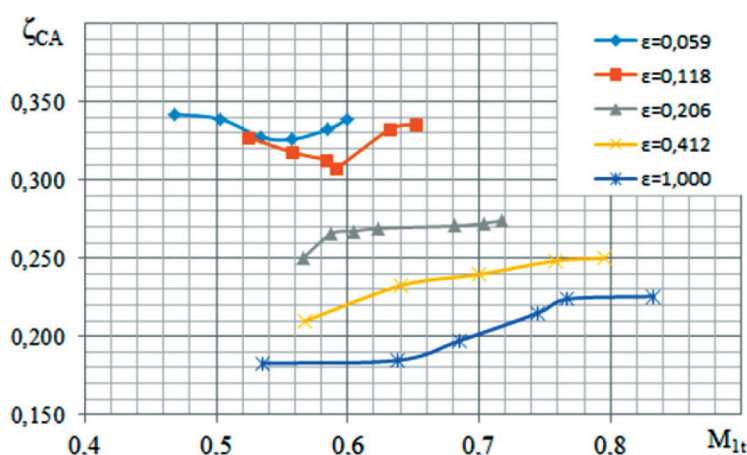


Рис. 2. Двухмерная зависимость коэффициента потерь в сопловом аппарате от числа Маха (M_{1t})

Графики зависимости коэффициента потерь в СА представляют собой визуальное отображение потерь энергии, которое может быть использовано для создания полиномов, выражающих зависимость ζ_{CA} от параметров M_{1t} и ϵ . Коэффициент потерь в СА может быть выражен в виде функции M_{1t} для каждой степени парциальности в диапазоне от 0,059 до 1,00 и в виде функции ϵ для соответствующего числа Маха:

– для диапазона M_{lr} от 0,47 до 0,60

$$\zeta_{CA}(\epsilon = 0,059) = 49,143M_{lr}^3 - 75,975M_{lr}^2 + 38,866M_{lr}; \quad (5)$$

– для диапазона M_{lr} от 0,52 до 0,65

$$\zeta_{CA}(\epsilon = 0,118) = -18,252M_{lr}^3 + 37,108M_{lr}^2 - 24,560M_{lr}; \quad (6)$$

– для диапазона M_{lr} от 0,57 до 0,72

$$\zeta_{CA}(\epsilon = 0,206) = 28,945M_{lr}^3 - 57,142M_{lr}^2 + 37,567M_{lr}; \quad (7)$$

– для диапазона M_{lr} от 0,57 до 0,80

$$\zeta_{CA}(\epsilon = 0,412) = 2,829M_{lr}^3 - 6,436M_{lr}^2 + 4,971M_{lr}; \quad (8)$$

– для диапазона M_{lr} от 0,53 до 0,83

$$\zeta_{CA}(\epsilon = 1,00) = -8,151M_{lr}^3 + 17,038M_{lr}^2 - 11,543M_{lr}. \quad (9)$$

Математическая модель, позволяющая определить коэффициент потерь в СА в зависимости от двух факторов (ϵ и M_{lr}) в соответствующем диапазоне M_{lr} (5)–(9), является важным инструментом данного исследования. На рис. 3 представлена двухпараметрическая зависимость $\zeta_{CA} = f(\epsilon, M_{lr})$, которая может быть аппроксимирована кубическим полиномом:

$$\begin{aligned} \zeta_{CA}(\epsilon, M_{lr}) = & 1,511 - 0,446\epsilon - 5,804M_{lr} + 1,397\epsilon^2 - 1,635\epsilon M_{lr} + \\ & + 9,869M_{lr}^2 - 0,501\epsilon^3 - 0,596\epsilon^2 M_{lr} + 1,902\epsilon M_{lr}^2 - 5,549M_{lr}^3. \end{aligned} \quad (10)$$

Такая модель позволяет более точно оценить значение ζ_{CA} для различных комбинаций значений ϵ и M_{lr} . Полиномиальное приближение позволяет учесть нелинейные эффекты и улучшить точность моделирования.

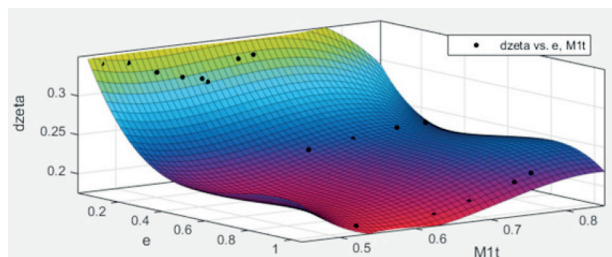


Рис. 3. Трехмерная зависимость коэффициента потерь в сопловом аппарате от числа Маха M_{lr} и степени парциальности ϵ

На рис. 2 видно, что максимальное значение ζ_{CA} достижимо для ступеней с минимальными значениями степени парциальности ϵ . Аналогичным образом определяется эмпирическая зависимость для коэффициента потерь в РК (рис. 4).

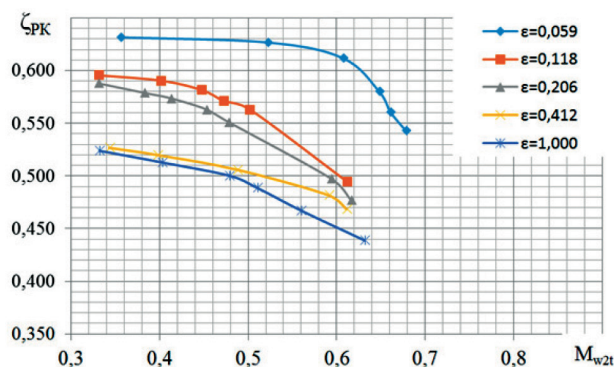


Рис. 4. Двухмерная зависимость коэффициента потерь в рабочем колесе от числа Маха (M_{w2r})

Коэффициент потерь кинетической энергии рабочего колеса ζ_{PK} является важным параметром в анализе эффективности работы турбинных ступеней. Зависимости $\zeta_{PK} = f(M_{w2t})$ и $\zeta_{PK} = f(\epsilon)$ позволяют оценить эти потери и могут быть представлены с помощью полиномов:

– для диапазона M_{w2t} от 0,36 до 0,68

$$\zeta_{PK}(\epsilon = 0,059) = -1,077M_{w2t}^3 + 1,951M_{w2t}^2 - 1,399M_{w2t} + 0,931; \quad (11)$$

– для диапазона M_{w2t} от 0,33 до 0,61

$$\zeta_{PK}(\epsilon = 0,118) = -1,307M_{w2t}^3 + 0,408M_{w2t}^2 + 0,153M_{w2t} + 0,547; \quad (12)$$

– для диапазона M_{w2t} от 0,33 до 0,62

$$\zeta_{PK}(\epsilon = 0,206) = -2,025M_{w2t}^3 + 1,802M_{w2t}^2 - 0,686M_{w2t} + 0,691; \quad (13)$$

– для диапазона M_{w2t} от 0,34 до 0,61

$$\zeta_{PK}(\epsilon = 0,412) = -3,691M_{lt}^3 + 4,714M_{lt}^2 - 2,123M_{lt} + 0,849; \quad (14)$$

– для диапазона M_{w2t} от 0,33 до 0,63

$$\zeta_{PK}(\epsilon = 1,00) = 0,311M_{lt}^3 - 1,163M_{lt}^2 + 0,613M_{lt} + 0,436. \quad (15)$$

В целом анализ зависимостей $\zeta_{PK} = f(M_{w2t})$ и $\zeta_{PK} = f(\epsilon)$ с использованием кубических полиномов предоставляет ценные инструменты для оптимизации работы турбинных ступеней и может быть дополнен двухпараметрическим полиномом $\zeta_{PK} = f(M_{w2t}, \epsilon)$:

$$\begin{aligned} \zeta_{PK}(\epsilon, M_{w2t}) = & 0,516 - 0,044M_{w2t} - 0,037\epsilon + 0,044M_{w2t}^2 + 0,0048\epsilon \times \\ & \times M_{w2t} - 0,006\epsilon^2 - 0,014M_{w2t}^3 - 0,0017M_{w2t}^2\epsilon - 0,0017\epsilon^2M_{lt} + 0,0058\epsilon^3. \end{aligned} \quad (16)$$

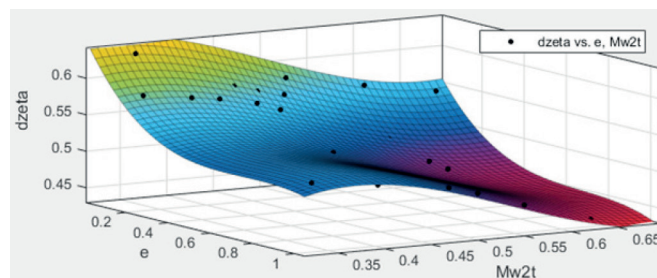


Рис. 5. Трехмерная зависимость коэффициента потерь в РК от числа Маха M_{w2t} и степени парциальности ϵ

На рис. 5 представлена графическое отображение двухпараметрической зависимости $\zeta_{PK} = f(\epsilon, M_{w2t})$. Аппроксимация результатов численного эксперимента позволяет получить не только математические зависимости, но и их графическое отображение.

Обсуждение (Discussion)

В ходе исследования проведен численный эксперимент и проанализированы полученные данные с расчетами по соответствующим формулам. Результаты работы показали, что применение математических зависимостей определения коэффициентов потерь в сопловом аппарате и рабочем колесе посредством универсальных полиномов в рамках действующей математической модели [13] являются адекватными, так как отклонение интегральной характеристики (КПД), полученной в ходе физического эксперимента с результатами математического расчета, не превышает 2,4 %.

Исследование имеет большое практическое значение, так как позволяет определить дополнительные потери от числа Маха для центростремительной турбины с частичным оборачиванием рабочего колеса. Это особенно важно при проектировании и эксплуатации энергетических установок, где эффективность и надежность работы турбин являются ключевыми факторами. Дальнейшие

исследования могут быть направлены на совершенствование моделей путем учета дополнительных факторов, которые могут оказывать влияние на работу турбин.

Выводы (Summary)

На основе анализа проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Получены математические полиномиальные зависимости коэффициентов потерь энергии в сопловом аппарате и рабочем колесе для каждой степени парциальности $\zeta_{CA} = f(\epsilon, M_{1r})$ и $\zeta_{PK} = f(\epsilon, M_{w2r})$, позволяющие дополнить и модернизировать действующую математическую модель.
2. С помощью применения метода аппроксимации были получены двухпараметрические зависимости коэффициентов потерь в СА и РК в виде кубических полиномов, которые позволяют определить значения потерь энергии в зависимости от некоторого диапазона числа Маха при конкретной парциальности ступени.
3. Полученные полиномиальные зависимости могут быть использованы для проведения расчетов проточной части с турбинной ступенью данного типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соловьев А. В. Повышение эффективности судовых энергетических установок / А. В. Соловьев, М. М. Чиркова, Н. Ф. Попов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2018. — № 4. — С. 101–106. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-4-101-106.
2. Ерофеев В. Л. О возможностях использования вторичных энергетических ресурсов в судовых ДВС / В. Л. Ерофеев, В. А. Жуков, О. В. Мельник // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 570–580.
3. Абул К. А. Оценка возможностей утилизационных установок главных двигателей крупнотоннажных судов транспортного флота / К. А. Абул // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2009. — № 1. — С. 121–125.
4. Матвеев В. Т. Характеристики рабочих процессов воздухонезависимых одноконтурных микрогазотурбинных установок для подводной техники / В. Т. Матвеев, В. А. Очеретяный, А. В. Дологлонян // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 612–618. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-612-618.
5. Епифанов А. А. Расчет трехмерного течения в ступенях малорасходных турбин / А. А. Епифанов, А. И. Кириллов, В. А. Рассохин // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. — 2012. — № 1 (142). — С. 65–70.
6. Забелин Н. А. Исследование особенностей течения в малорасходных турбинных ступенях конструкции ЛПИ / Н. А. Забелин, Г. Л. Раков, В. А. Рассохин, А. А. Себедев, М. В. Смирнов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. — 2013. — № 1 (166). — С. 45–53.
7. Rassokhin V. The design of microturbine units with low-consumed turbines constructed by LPI for heat recovery of exhaust gases of internal combustion engines / V. Rassokhin, N. Zabelin, H. Kunte, J. Seume, S. Olenikov, M. Cherkasova, A. Sebelev // Results of joint research activity of scientists from Saint-Petersburg State Polytechnical University and Leibniz University of Hannover. — Polytechnical University Publishing House, 2014. — Pp. 139–155.
8. Rakov G. A low emission axial-flow turbine for the utilization of compressible natural gas energy in the gas transport system of Russia / G. Rakov, V. Rassokhin, N. Zabelin, S. Olennikov, A. Sebelev, A. Sukhanov, S. Schislyayev // International Journal of environmental & science education. — 2016. — Vol. 11. — No. 18. — Pp. 11721–11733.
9. Smirnov M. V. Effects of hub endwall geometry and rotor leading edge shape on performance of supersonic axial impulse turbine. Part I / M. V. Smirnov, A. A. Sebelev, N. A. Zabelin, N. I. Kuklina // Proceedings of 12th European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics. — Stockholm, Sweden, 2017. — Paper ID: ETC2017–100.
10. Крюков А. А. Трехмерное численное моделирование малорасходной центростремительной турбины с частичным облопачиванием рабочего колеса / А. А. Крюков, С. В. Чехранов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2021. — № 1. — С. 74–80. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-1-74-80.

11. Крюков А. А. Сравнение значений коэффициентов скорости в турбинной ступени с частичным облопачиванием рабочего колеса / А. А. Крюков, С. В. Чехранов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 2. — С. 257–265. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-257-265.

12. Крюков А. А. Численное исследование течения потока в ступени центробежной турбины с частичным облопачиванием рабочего колеса / А. А. Крюков, С. В. Чехранов // Морские интеллектуальные технологии. — 2020. — № 4–1 (50). — С. 114–120. DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.016.

13. Чехранов С. В. Математическая модель радиальной малорасходной турбины с частичным облопачиванием рабочего колеса / С. В. Чехранов, Р. Р. Симашов // Транспортное дело России. — 2015. — № 6. — С. 222–226.

REFERENCES

1. Soloviev, Alexey Valerievich, Margarita Makarovna Chirkova, and Nikolay Frolovich Popov. “Improving the efficiency of ship power plants.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 4 (2018): 101–106. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-4-101-106.

2. Erofeev, Valentin L., Vladimir A. Zhukov, and Olesya V. Melnik. “On the possibilities of using secondary energy resources in marine engine.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.3 (2017).

3. Abul, Kalam Azad. “Estimation of possibilities of heat recovery plants of the propulsion engines of large-capacity vessels of transport fleet.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 1 (2019): 121–125.

4. Matvienko, Valerii T., Volodymyr A. Ocheretianyi, and Andrey V. Dologlonyan. “Characteristics of operational processes of air independent single-circuit micro gas-turbine installations for underwater technology.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.3 (2017): 612–618. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-612-618.

5. Epifanov, A. A., A. I. Kirillov, and V. A. Rassokhin. “Raschet trehmernogo techeniya v stupenjah malorashodnykh turbin.” *Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta* 1(142) (2012): 65–70.

6. Zabelin, N. A., G. L. Rakov, V. A. Rassokhin, A. A. Sebelev, and M. V. Smirnov. “Research of flow characteristics in low flow rate LPI turbine stages.” *St. Petersburg State Polytechnical University Journal* 1(166) (2013): 45–53.

7. Rassokhin, V., N. Zabelin, H. Kunte, J. Seume, S. Olennikov, M. Cherkasova, and A. Sebelev. “The design of microturbine units with low-consumed turbines constructed by LPI for heat recovery of exhaust gases of internal combustion engines.” *Results of joint research activity of scientists from Saint-Petersburg State Polytechnical University and Leibniz University of Hannover*. Polytechnical University Publishing House, 2014. 139–155.

8. Rakov, Gennadiy, Viktor Rassokhin, Nikolay Zabelin, Sergey Olennikov, Aleksandr Sebelev, Aleksandr Sukhanov, and Sergey Schislyayev. “A Low Emission Axial-Flow Turbine for the Utilization of Compressible Natural Gas Energy in the Gas Transport System of Russia.” *International Journal of environmental & science education* 11.18 (2016): 11721–11733.

9. Smirnov, M. V., A. A. Sebelev, N. A. Zabelin, and N. I. Kuklina. “Effects of hub endwall geometry and rotor leading edge shape on performance of supersonic axial impulse turbine. Part I.” *Proceedings of 12th European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics*. Stockholm, Sweden. 2017.

10. Kriukov, Aleksei Alekseevich, and Sergei Valentinovich Chekhranov. “Three-dimensional numerical simulation of low-consumption inflow turbine with partial blading of runner.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 1 (2021): 74–80. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-1-74-80.

11. Kryukov, Aleksey A., and Sergei V. Chekhranov. “Comparison of the velocity coefficients values in the turbine stage with partial blading of the runner.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.2 (2021): 257–265. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-2-257-265.

12. Kryukov, A. A., and S. V. Chekhranov. “Numerical experiment of flow in stages of inflow turbine with fractional blading of the rotor wheel.” *Marine intellectual technologies* 4–1(50) (2020): 114–120. DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.016.

13. Chekhranov, S., and R. Simashov. “Mathematical model of a radial-flow low-consumption turbine having partially bladed wheel rotor.” *Transport business of Russia* 6 (2015): 222–226.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Крюков Алексей Алексеевич —

старший преподаватель

ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный
технический рыбохозяйственный университет»

690087, Российская Федерация, г. Владивосток,
ул. Луговая, 52б

e-mail: aleksey902@mail.ru

Куличков Сергей Владимирович —

кандидат технических наук, доцент

ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный
университет»

690922, Российская Федерация, г. Владивосток,
остров Русский, п. Аякс, д. 10

e-mail: seku230@yandex.ru

Ратников Александр Александрович —

заведующий лабораторией компьютерного
моделирования

ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный
университет»

690922, Российская Федерация, г. Владивосток,
остров Русский, п. Аякс, д. 10

e-mail: ratnikov.aa@dvfu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kryukov, Aleksey A. —

Senior lecturer

Far Eastern State Technical Fisheries
University

52B Lugovaya Str., Vladivostok, 690087,
Russian Federation

e-mail: aleksey902@mail.ru

Kulichkov, Sergei V. —

PhD, associate professor

Far Eastern Federal University

10 Ajax Bay, Russky Island,
Vladivostok, 690922,
Russian Federation

e-mail: seku230@yandex.ru

Ratnikov, Alexander A. —

Head of the Laboratory
of Computer Modeling

Far Eastern Federal University

10 Ajax Bay, Russky Island,
Vladivostok, 690922,
Russian Federation

e-mail: ratnikov.aa@dvfu.ru

Статья поступила в редакцию 24 августа 2023 г.

Received: August 24, 2023.