

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-849-857

NUMERICAL SIMULATION OF THE VELOCITY COEFFICIENT OF THE NOZZLE DIAPHRAGM OF A LOW-CONSUMPTION TURBINE

A. A. Kryukov

Far Eastern State Technical Fisheries University,
Vladivostok, Russian Federation

The subject of the research is modern marine turbomachines which differ in many types, designs, purposes, materials and working bodies. It is noted that this diversity is guaranteed by the use of modern computer technologies from the stage of preliminary preparation of production to the release of final products. The design stage of turbine units taking into account the external characteristics of the turbine stage — power, speed, efficiency, shaft torque and others is considered. The efficiency of the stage is expressed by the efficiency coefficient, which is determined by the energy losses available in the stage. Losses, in turn, are expressed by losses in each individual element of the turbine stage design. At the same time, it is noted that the losses in the nozzle apparatus are decomposed into friction losses, edge and end losses. The object of the study is the nozzle apparatus of a low-consumption inflow turbine. The subject of the study is the velocity coefficient of the nozzle apparatus of a low-consumption inflow turbine. The research method is numerical simulation of gas flow using computational gas dynamics. The purpose of the study is to compare the value of the speed coefficient of the nozzle apparatus obtained during a physical experiment with the results of numerical modeling of the nozzle apparatus with subsonic (narrowing) channels. The conducted studies have shown that low-consumption inflow turbines are characterized by small sizes that do not allow us to fully carry out a physical experiment. A graph of the dependence of the velocity coefficient of the nozzle apparatus on the Mach number is provided in the study. A good convergence of the values of the velocity coefficient of the nozzle apparatus obtained by the numerical method with the results of the physical experiment has been established. The velocity fields of the flow part of the nozzle apparatus are obtained in the range of the Mach number ranging from 0.66 to 0.88. The possibility of using numerical modeling for this type of nozzle apparatus is concluded.

Keywords: nozzle diaphragm, velocity coefficients, simulation, numerical method, experiment, Mach number, calculation grid, gas dynamics, low-consumption.

For citation:

Kryukov, Aleksey A. “Numerical simulation of the velocity coefficient of the nozzle diaphragm of a low-consumption turbine.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.6 (2021): 849–857. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-849-857.

УДК 621.515.001.5

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА СКОРОСТИ СОПЛОВОГО АППАРАТА МАЛОРАСХОДНОЙ ТУРБИНЫ

А. А. Крюков

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

Предметом исследования работы являются современные судовые турбомашины, отличающиеся многообразием видов, конструкций, назначений, материалов и рабочих тел. Отмечается, что это многообразие гарантировано использованием современных компьютерных технологий от стадии предварительной подготовки производства до выпуска конечной продукции. Рассмотрен этап проектирования турбоагрегатов, учитывающий внешние характеристики турбинной ступени: мощность, частоту вращения, коэффициент полезного действия, вращающий момент на валу и др. Эффективность ступени выражается коэффициентом полезного действия, который определяется потерями энергии, имеющимися в ступени. Потери,

в свою очередь, выражаются потерями в каждом отдельном элементе конструкции турбинной ступени. При этом отмечается, что потери в сопловом аппарате разделяются на потери на трение, кромочные и концевые. Объектом исследования является сопловой аппарат центростремительной малорасходной турбины. Предметом исследования является коэффициент скорости соплового аппарата малорасходной центростремительной турбины. Цель исследования — сравнить значения коэффициентов скорости соплового аппарата, полученных в ходе физического эксперимента, с результатами численного моделирования. Методом исследования является численное моделирование течения газа с применением вычислительной газодинамики. Основной задачей исследования является сопоставление значения коэффициента скорости соплового аппарата, полученного в ходе физического эксперимента, с результатами численного моделирования соплового аппарата с дозвуковыми (сужающимися) каналами. Проведенные исследования показали, что малорасходные радиальные турбины характеризуются небольшими размерами, не позволяющими выполнить физический эксперимент. В исследовании приводится график зависимости коэффициента скорости соплового аппарата от числа Маха. Установлена хорошая сходимость значений коэффициента скорости соплового аппарата, полученного численным методом, с результатами физического эксперимента. Получены поля скоростей проточной части соплового аппарата в диапазоне числа Маха 0,66–0,88. Сделаны выводы о возможности применения численного моделирования для подобного типа сопловых аппаратов.

Ключевые слова: сопловой аппарат, коэффициент скорости, моделирование, численный метод, эксперимент, число Маха, расчетная сетка, газодинамика, малорасходная турбина.

Для цитирования:

Крюков А. А. Численное моделирование коэффициента скорости соплового аппарата малорасходной турбины / А. А. Крюков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 6. — С. 849–857. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-849-857.

Введение (Introduction)

Малорасходные радиальные турбин, применяемые в судовых установках, имеют некоторые достоинства по сравнению с осевыми микротурбинами. Для обеспечения высокой эффективности необходимо подбирать параметры с учетом оптимальных значений соотношений и достоверно оценивать потери в элементах малорасходных турбин.

Физические эксперименты по расчету коэффициента скорости соплового аппарата, описанные в работе А. С. Наталевич [1], позволили определить зависимость коэффициента скорости соплового аппарата от числа Маха: $\varphi = f(M_1)$. Воздействие числа Маха на потери в проточной части соплового аппарата (СА) определялось на стенде для статических продувок решеток. Было выполнено исследование решеток с дозвуковыми сопловыми каналами при варьировании параметров рабочего тела в следующем диапазоне:

$$p_0^* = 2 \cdot 10^5 \dots 7 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$p_1 = 8 \cdot 10^4 \dots 2,7 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$T_1^* = 295 \text{ К}.$$

В сопловых решетках число Рейнольдса (Re) изменялось в диапазоне $3 \cdot 10^5 \dots 9 \cdot 10^5$. Данное изменение в указанных пределах привело к изменению коэффициента скорости соплового аппарата не более чем на 1,2 %.

Замена физического эксперимента численным позволяет сделать следующие выводы:

- целесообразность использования новейших информационных технологий для получения коэффициента скорости соплового аппарата;
- создание рекомендаций для проведения численных экспериментов подобных малорасходных турбин.

Компьютерное моделирование соплового аппарата с соразмерными и режимными параметрами может служить проверочным вариантом для подбора конечно-элементной сетки с определенными критериями. Используя численные эксперименты, можно определить характерные особенности пространственного течения потока в сопловом аппарате малорасходной центростремительной турбины с помощью виртуального стенда.

Цель исследования — сравнить значения коэффициентов скорости соплового аппарата, полученных в ходе физического эксперимента, с результатами численного моделирования

Задачи исследования:

- создать расчетную сетку для геометрической модели соплового аппарата малорасходной радиальной турбины;
- провести численное моделирование по принятым граничным условиям;
- сопоставить значения коэффициента скорости соплового аппарата, полученного в ходе физического эксперимента с результатами численного моделирования;
- сформулировать методические рекомендации для моделирования подобных малорасходных турбин.

Объект исследования — сопловой аппарат центростремительной малорасходной турбины.

Предметом исследования являются коэффициент скорости соплового аппарата малорасходной центростремительной турбины.

Метод исследования — численное моделирование течения газа с применением вычислительной газодинамики.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Малорасходные турбины имеют следующие специфические особенности: низкое число Рейнольдса ($Re < 10^5$), малые относительные значения высоты и длины лопаток, большие значения относительных толщин кромок лопаток, шероховатости и зазоров. Указанные особенности не могут позволить проводить физический эксперимент. Применение метода численного моделирования при исследовании особенностей структуры потока в проточной части соплового аппарата малорасходной турбины позволяет минимизировать влияние специфических особенностей на результаты эксперимента.

Численное моделирование в данном исследовании применяется в качестве тестируемого к проведенному физическому эксперименту с целью определения коэффициента скорости соплового аппарата. Это позволяет создавать виртуальный стенд для дальнейших исследований подобных типов турбин и, как следствие, снижать затраты времени и ресурсов за счет снижения количества экспериментов на физической турбинной ступени.

В настоящее время, ввиду значительного прогресса в области компьютерной индустрии, появилась возможность исследования потоков газа числовым методом вычислительной газовой динамики (CFD-метод) [2], базирующемся на численном определении системы уравнений Навье – Стокса, который описывает течение рабочего тела на основе основных законов сохранения энергии с минимальными допущениями. Кроме того, имеется большое количество исследований в области малорасходных турбин, опубликованных в отечественных [3]–[5] и зарубежных журналах [6]–[8] с использованием численных методов решения уравнений, которые описывают перетекание неламинарного потока рабочего тела. Применение этого метода накладывает дополнительные условия на профессиональный подход и проверку достоверности получаемых расчетных значений путем сопоставления их с результатами физического эксперимента.

Процесс численного моделирования течения рабочего тела в сопловом аппарате малорасходной турбинной ступени состоит из следующих стадий [9]–[11]:

- создание трехмерной объемной модели соплового аппарата с последующим созданием геометрической модели проточной части сопловых каналов с применением CAD-систем;
- генерация и анализ конечно-элементной сетки, определение параметров сетки;
- создание расчетной модели, на которую накладываются граничные условия, используемые в численном эксперименте (параметры рабочего тела и модели турбулентности, частота вращения, интерфейс сопряжения, количество итераций и др.);
- поиск решения с учетом требуемых значений невязок и небалансов, занимающий продолжительное время для проведения численного моделирования;
- анализ выходных данных численного моделирования.

На основе обобщенных данных выбрана турбинная ступень с техническими характеристиками соплового аппарата, представленными в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики соплового аппарата малорасходной турбины

Угол наклона сопел соплового аппарата, град.	Высота сопла l_c , мм	D_n , мм	$D_{вн}$, мм	Кромка «вход» $\Delta_{вх}$, мм	Кромка «выход» $\Delta_{вых}$, мм	Ширина горла a_1 , мм	$\epsilon_{экв}$	Z_{CA} сопел СА
18	2	60	50	0,9	0,2	1,4	1	30

Схема соплового аппарата малорасходной турбинной ступени приведена на рис. 1, визуальная трехмерная модель — на рис. 2.

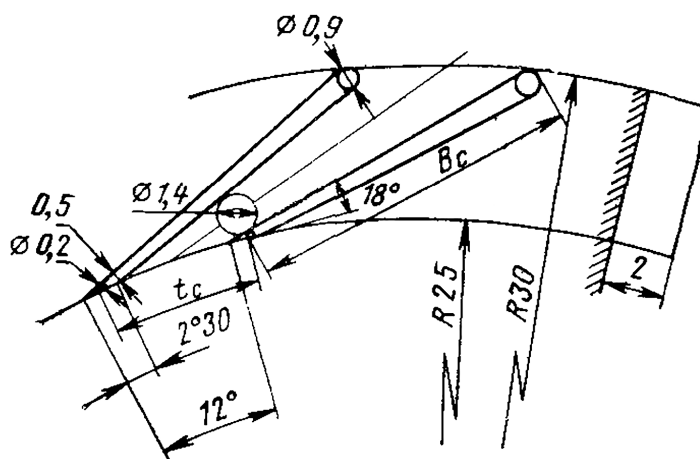


Рис. 1. Конструктивная схема соплового аппарата центробежной турбины

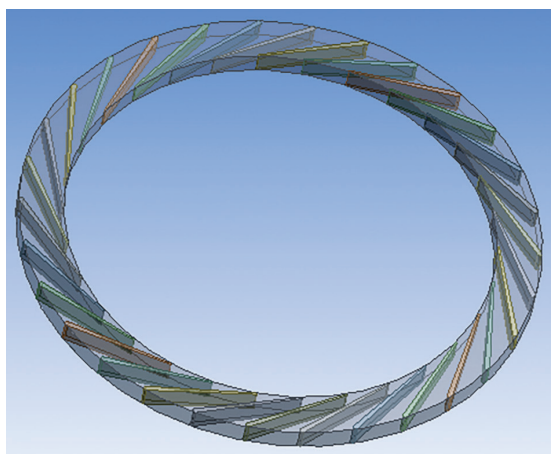


Рис. 2. Трехмерная объемная модель соплового аппарата центробежной турбины

Граничные условия, накладываемые на численное исследование [12]:

- постановка задачи — стационарная задача Frozen Rotor;
- рабочее тело — Air Ideal Gas (воздух);
- модель турбулентности — SST (Shear Stress Transport);
- давление торможения потока на входе в сопловой аппарат — $3 \cdot 10^5$ Па;
- температура потока газа на входе в проточную часть — 295 К;
- давление в потоке газа на выходе из проточной части — $1,53\text{--}2 \cdot 10^5$ Па.

Результаты (Results)

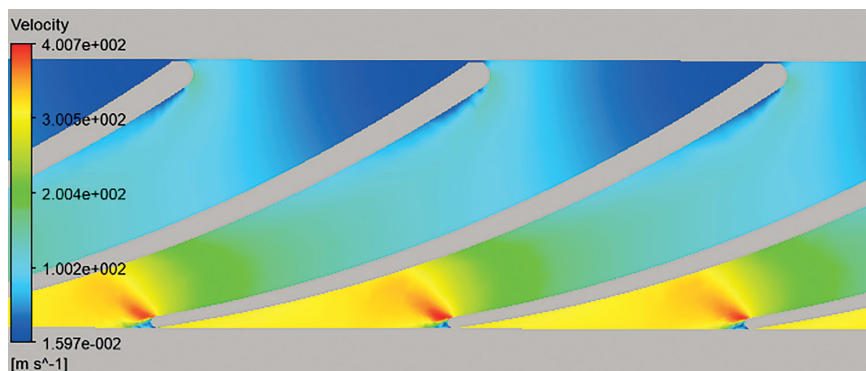
Основные результаты численного исследования приведены в табл. 2 и 3. Поля скоростей показаны на рис. 3 и 4.

Таблица 2

Основные результаты исследования при числах Маха 0,88 и 0,8

Результаты при числе Маха $M = 0,88$			Результаты при числе Маха $M = 0,8$		
Величина	Значение	Единица измерения	Величина	Значение	Единица измерения
Давление на входе в канал проточной части p_0^*	0,3	МПа	Давление на входе в канал проточной части p_0^*	0,3	МПа
Давление на выходе из канала проточной части p_1	0,153	МПа	Давление на выходе из канала проточной части p_1	0,168	МПа
Число Маха на выходе из канала проточной части M_1	0,88	—	Число Маха на выходе из канала проточной части M_1	0,8	—
Скорость потока на выходе из канала проточной части c_1	282,175	м/с	Скорость потока на выходе из канала проточной части c_1	261,01	м/с
Коэффициент скорости СА φ	0,876	—	Коэффициент скорости СА φ	0,868	—
Коэффициент потерь в СА ζ_c	0,232	—	Коэффициент потерь в СА ζ_c	0,247	—

а)



б)

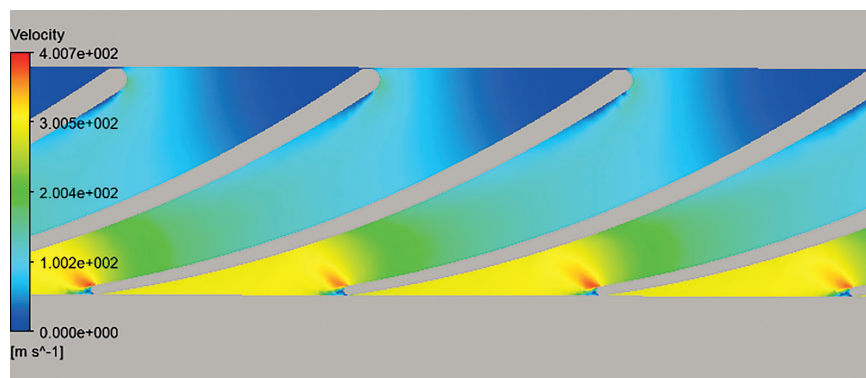


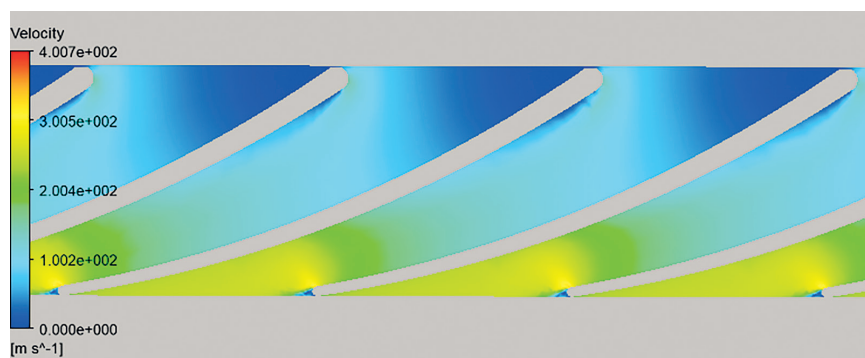
Рис. 3. Поле скоростей в сопловом аппарате с числами Маха на выходе:
а — $M_1 = 0,88$; б — $M_1 = 0,8$

Таблица 3

Основные результаты исследования при числах Маха 0,66 и 0,75

Результаты при числе Маха $M = 0,66$			Результаты при числе Маха $M = 0,75$		
Величина	Значение	Единица измерения	Величина	Значение	Единица измерения
Давление на входе в канал проточной части p_0^*	0,3	МПа	Давление на входе в канал проточной части p_0^*	0,3	МПа
Давление на выходе из канала проточной части p_1	0,2	МПа	Давление на выходе из канала проточной части p_1	0,171	МПа
Число Маха на выходе из канала проточной части M_1	0,66	—	Число Маха на выходе из канала проточной части M_1	0,75	—
Скорость потока на выходе из канала проточной части c_1	219,103	м/с	Скорость потока на выходе из канала проточной части c_1	256,5	м/с
Коэффициент скорости СА φ	0,86	—	Коэффициент скорости СА φ	0,865	—
Коэффициент потерь в СА ζ_c	0,26	—	Коэффициент потерь в СА ζ_c	0,252	—

а)



б)

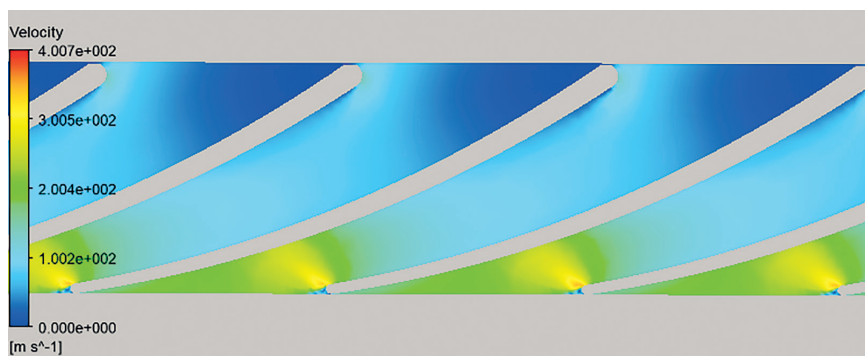


Рис. 4. Поле скоростей в сопловом аппарате с числами Маха на выходе:
а — $M_1 = 0,66$; б — $M_1 = 0,75$

Обсуждение (Discussion)

На основе выполненного анализа табл. 2 и 3 построен график зависимости коэффициента скорости соплового аппарата от числа Маха (рис. 5), на котором видно, что отклонение значений

коэффициента φ между физическим экспериментом и результатом, полученным на виртуальном стенде, не более 0,5 % в диапазоне числа Маха, $M = 0,66 \dots 0,88$.

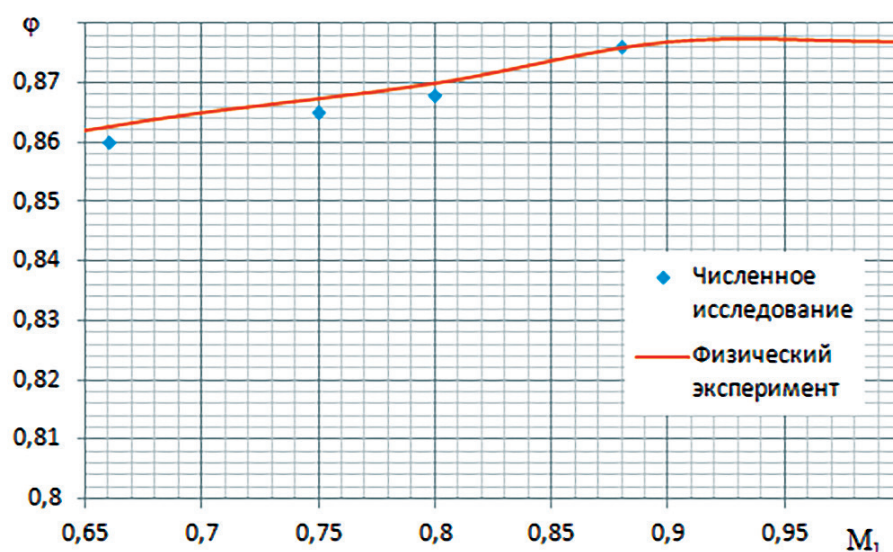


Рис. 5. Зависимость коэффициента скорости соплового аппарата от числа Маха

Численное исследование является лишь виртуальным воспроизведением реальной модели, достоверность которой определяется полнотой раскрытия исследуемых явлений, а также зависит от недочетов физической и численной моделей. В целом численная модель исследования полновальна для реальной модели.

Течение потока в сопловом аппарате формируется геометрическим размером проточной части, термодинамическими параметрами газа, а также принятыми граничными критериями в сопловом аппарате турбинной ступени.

Заключение (Conclusion)

На основе проведенного численного исследования можно сделать следующие выводы:

- полученные поля скоростей наглядно демонстрируют потери кинетической энергии в проточной части соплового аппарата центростремительной турбины, а также место максимального сужения соплового канала — горла сопла;
- анализ результатов численного метода показал точность использования этого метода с определенными геометрическими размерами и параметрами соплового аппарата;
- отклонения значений коэффициента скорости φ между двумя методами определения не выходят за границы погрешности опыта, следовательно, применение моделирования можно рассматривать в качестве замены и / или дополнения к физическому опыту для нахождения коэффициентов скорости в сопловых решетках данного типа;
- предложены методические рекомендации к основным критериям расчетной конечно-элементной сетки и граничным условиям, позволяющие получить выходные параметры для соплового аппарата подобного типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Наталевич А. С. Воздушные микротурбины / А. С. Наталевич. — М.: Машиностроение, 1979. — 192 с.
2. 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.

3. Забелин Н. А. Исследование особенностей течения в малорасходных турбинных ступенях конструкции ЛПИ / Н. А. Забелин [и др.] // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. — 2013. — № 1 (166). — С. 45–53.

4. Нгуен А. К. Характеристики и структура потока турбинной ступени с отрицательным градиентом степени реактивности / А. К. Нгуен, К. Л. Лапшин // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. — 2016. — № 2 (243). — С. 163–173. DOI: 10.5862/JEST.243.17.

5. 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. Olennikov, 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.

6. 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. Schislyaev // International Journal of environmental & science education. — 2016. — Vol. 11. — No. 18. — Pp. 11721–11733.

7. 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.

8. Sebelev A. Design and numerical analysis of processes in siloxane vapor driven turbine / A. Sebelev, R. Scharf, N. Zabelin, M. Smirnov // Proceedings of the 3rd International Seminar on ORC Power Systems. Brussels, Belgium. — 2015. — Pp. 640–649.

9. Нгуен Ан. К. Влияние тангенциального наклона рабочих лопаток на потери кинетической энергии / Ан. К. Нгуен, К. Л. Лапшин // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. — 2017. — Т. 23. — № 4. — С. 66–73. DOI: 10.18721/JEST.230406.

10. Kryukov A. A. Determination of the velocity coefficient of a turbine nozzle diaphragm with partial blading of the runner / A. A. Kryukov, G. L. Rakov, S. V. Chekhranov, R. R. Simashov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — IOP Publishing, 2020. — Vol. 986. — Is. 1. — Pp. 012045. DOI: 10.1088/1757-899X/986/1/012045.

11. Крюков А. А. Численное исследование течения потока в ступени центростремительной 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.

12. Крюков А. А. Трехмерный газодинамический расчет соплового аппарата малорасходной центростремительной турбины / А. А. Крюков // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2019. — № 4. — С. 89–95. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-4-89-95.

REFERENCES

1. Nataleovich, A. S. *Vozdushnye mikroturbiny*. M.: Mashinostroenie, 1979.
2. Epifanov, A. A., A. I. Kirillov, and V. A. Rassokhin. “Raschet trekhmernogo techeniya v stupenjah malorashodnykh turbin.” *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta* 1(142) (2012): 65–70.
3. 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.
4. Nguyen, A. Q., and K. L. Lapshin. “Characteristics and structure of the flow in a turbine stage with a negative gradient of the degree of reactivity.” *St. Petersburg State Polytechnical University Journal* 2(243) (2016) 163–173. DOI: 10.5862/JEST.243.17.
5. Nguyen, A. Q., and K. L. Lapshin. “The influence of tangential inclination of rotor blades on kinetic energy losses in an axial turbine stage.” *St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Science and Technology* 23.4 (2017): 66–73. DOI: 10.18721/JEST.230406.
6. Kryukov, A. A., G. L. Rakov, S. V. Chekhranov, and R. R. Simashov. “Determination of the velocity coefficient of a turbine nozzle diaphragm with partial blading of the runner.” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 986. No. 1. IOP Publishing, 2020. DOI: 10.1088/1757-899X/986/1/012045.

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 Schislyaev. "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. Paper ID: ETC2017–100.

10. Sebelev, A., R. Scharf, N. Zabelin, and M. Smirnov. "Design and numerical analysis of processes in siloxane vapor driven turbine." *Proceedings of the 3rd International Seminar on ORC Power Systems*. Brussels, Belgium. 2015. 640–649.

11. Krykov, Aleksey A., and Sergei V. Chekhranov. "Numerical experiment of flow in stages of inflow turbine with fractional blading of the rotor wheel." *Marine intelligent technologies* 4–1(50) (2020): 114–120. DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.016.

12. Kriukov, Aleksei Alekseevich. "Three dimensional gas-dynamic calculation of nozzle block of small flow-rate centripetal turbine." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 4 (2019): 89–95. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-4-89-95.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kryukov, Aleksey A. —
Senior lecturer
Far Eastern State Technical
Fisheries University
52B Lugovaya Str., Vladivostok, 690087,
Russian Federation
e-mail: aleksey902@mail.ru

Статья поступила в редакцию 25 октября 2021 г.

Received: October 25, 2021.