

Научная статья
УДК 621.515.001.5
<https://doi.org/10.24143/2073-1574-2023-1-23-29>
EDN GLIXLZ

Влияния угла наклона сопел на коэффициент скорости центростремительной турбины с частичным облопачиванием рабочего колеса

Алексей Алексеевич Крюков

*Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,
Владивосток, Россия, Aleksey902@mail.ru*

Аннотация. Рассматривается численный эксперимент с тремя группами малорасходных центростремительных турбин с частичным облопачиванием рабочего колеса. Разработаны геометрические модели турбинных ступеней с частичным облопачиванием рабочего колеса при различном угле наклона сопел. Исследуются центростремительные турбинные ступени с частичным облопачиванием рабочего колеса. Рассчитывается коэффициент полезного действия и коэффициент скорости сопел центростремительной турбины. Проведено численное моделирование течения рабочего тела с применением элементов вычислительной газодинамики. Выявлены максимальные значения коэффициента скорости соплового аппарата и коэффициента полезного действия турбинной ступени. Разработаны геометрические модели турбинных ступеней с различным углом наклона сопел, определены граничные условия эксперимента, проанализированы и представлены результаты эксперимента. Приводятся графики зависимости коэффициента скорости сопел и коэффициента полезного действия ступени центростремительной малорасходной турбины. Проведен сравнительный анализ коэффициента скорости сопла и коэффициента полезного действия трех турбинных ступеней с различным углом наклона сопел соплового аппарата. Сделаны выводы о необходимости дальнейшего рассмотрения мероприятий по совершенствованию проточной части рабочего колеса для увеличения эффективности ступени.

Ключевые слова: сопловой аппарат, коэффициент потерь, кинетическая энергия, численный метод, эксперимент, расчетная сетка, газодинамика, малорасходная турбина

Для цитирования: *Крюков А. А.* Влияния угла наклона сопел на коэффициент скорости центростремительной турбины с частичным облопачиванием рабочего колеса // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология.* 2023. № 1. С. 23–29. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2023-1-23-29>. EDN GLIXLZ.

Original article

Influence of nozzle inclination angle on velocity coefficient of inflow turbine with partial blading of runner

Aleksei A. Kriukov

*Far Eastern State Technical Fisheries University,
Vladivostok, Russia, Aleksey902@mail.ru*

Abstract. The paper considers a numerical experiment with three groups of low-consuming inflow turbines with partial blading of the runner. Geometrical models of the turbine stages with partial blading of the runner at different angles of the nozzle inclination have been developed. The inflow turbine stages with partial blading of the runner are investigated. The efficiency and speed coefficient of the inflow turbine nozzles are calculated. There has been carried out numerical modeling of the working fluid flow by using the computational gas dynamics elements. Pick values of the nozzle apparatus velocity coefficient and the turbine stage efficiency are defined. Geometric models of the turbine stages with different nozzle inclination angles are developed, the boundary conditions of the experiment are determined, and the experiment results are analyzed and shown. There are given the dependence graphs of the nozzle velocity coefficient and the efficiency of a low-consuming inflow turbine stage. Comparative analysis of the nozzle velocity coefficient and the efficiency of three turbine stages with different inclination angles of the nozzles in the nozzle apparatus has been carried out. Conclusions are drawn about further procedures on improving the flow part of the runner to increase the efficiency of the stage.

Keywords: nozzle apparatus, loss coefficient, kinetic energy, numerical method, experiment, computational grid, gas dynamics, low-consumption turbine

For citation: Kriukov A. A. Influence of nozzle inclination angle on velocity coefficient of inflow turbine with partial blading of runner. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies.* 2023;1:23-29. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2023-1-23-29>. EDN GLIXLZ.

Введение

Перспективной задачей развития мирового водного транспорта является повышение уровня безопасности, экологичности и эффективности грузоперевозок. Один из пунктов данной задачи – поиск новых способов повышения энергоэффективности судовых энергетических установок (СЭУ) [1, 2]. Востребованными источниками сбро-совой энергии являются уходящие газы судовых ди-зелей и охлаждающая вода. Увеличение эффек-тивности работы СЭУ за счет источников сбро-сового теп-ла, таких как утилизационные котлы и турбогенера-торы, окажет положительное влияние на экономиче-ские и экологические показатели СЭУ [3].

В последнее время набирает популярность ис-пользование ресурсов Мирового океана как источ-ника полезных ископаемых, аквакультуры и сырь-евой базы. При этом используется подводная тех-ника, ее цели связаны с добычей полезных ископа-емых, биоресурсов и пр. Обеспечение энергией подводных аппаратов зависит от степени энерго-оснащенности самих аппаратов. Более компактно-ми и энергонезависимыми являются малорасход-ные турбины (микротурбины) [4].

Цель исследования – определение максимального значения коэффициента скорости сопла и коэффици-ента полезного действия (КПД) турбинной ступени.

Задачи исследования:

- создание геометрических моделей турбинных ступеней с различным углом наклона сопел;
- генерирование конечно-элементной расчет-ной сетки для сопловой решетки;
- осуществление виртуального опыта по требова-ниям и граничным критериям исследуемой модели;
- анализ значения φ и КПД трех групп турбин-ных ступеней с различным углом наклона сопел.

Объект исследования – центробежные турби-нные ступени с частичным облопачиванием рабочего колеса (РК).

Предмет исследования – КПД и коэффициент скорости сопел центробежной турбины.

Метод исследования – численное моделирова-ние течения рабочего тела с применением элемен-тов вычислительной газодинамики.

Постановка задачи

Приоритетное значение КПД создает цель по совершенствованию характеристик устройств и механизмов. Снижение потерь энергии от парци-альности привело к появлению новейших типов турбин. Одним из таких типов являются турбомаш-ины с частичным облопачиванием РК.

Выявление КПД турбинной ступени, а также ко-эффициента скорости сопел при различном значении угла наклона сопел позволит судить о возможном совершенствовании соплового аппарата (СА) в част-ности и ступени в целом. Значительное количество научных исследований в сфере малорасходных турбомашин, опубликованных в российских [5–7] и зарубежных изданиях [8, 9], проводились с ис-пользованием элементов вычислительной газоди-намики, которые описывают перемещение рабоче-го тела в ступени. Численные эксперименты с ис-пользованием виртуального газодинамического стенда осуществляются в соответствии с рекомен-дациями, описанными в источниках [10, 11].

В качестве объекта исследования выбрана ступ-ень с техническими параметрами, которые приве-дены в табл. 1. Трехмерная модель объекта иссле-дования представлена на рис. 1.

Таблица 1

Table 1

Габаритные параметры ступени центробежной турбины

Dimensional parameters of the inflow turbine stage

Угол наклона лопаток СА, град			Высота сопла l_c , мм	D_0 , мм	D_1 , мм	D_2 , мм	Шаг сопел t_{CA} , мм	Ширина горла a_1 , мм	Высота сопла l_1 , мм	Z_{CA} , шт.	Z_{PK} , шт.
12,46	16,31	20,80	2,53	60	50	27,5	5,88	1,45	2,53	27	34

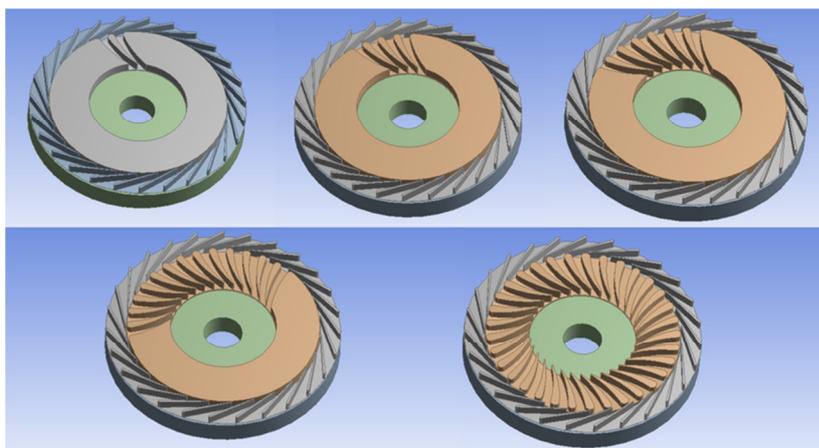


Рис. 1. Трехмерные турбинные ступени модели объекта исследования
Fig. 1. Three-dimensional turbine stages of the model of a research object

Результаты исследования

В проведенном на виртуальном стенде численном эксперименте степень парциальности является постоянной, относительный шаг рабочей лопатки остается неизменным. Эксперимент проводился с парциальностью 0,059; 0,118; 0,206; 0,412 и 1,00 [12].

На рис. 2 представлены поля скоростей с турбинной ступенью при различном угле наклона сопел α_{1r} в СА.

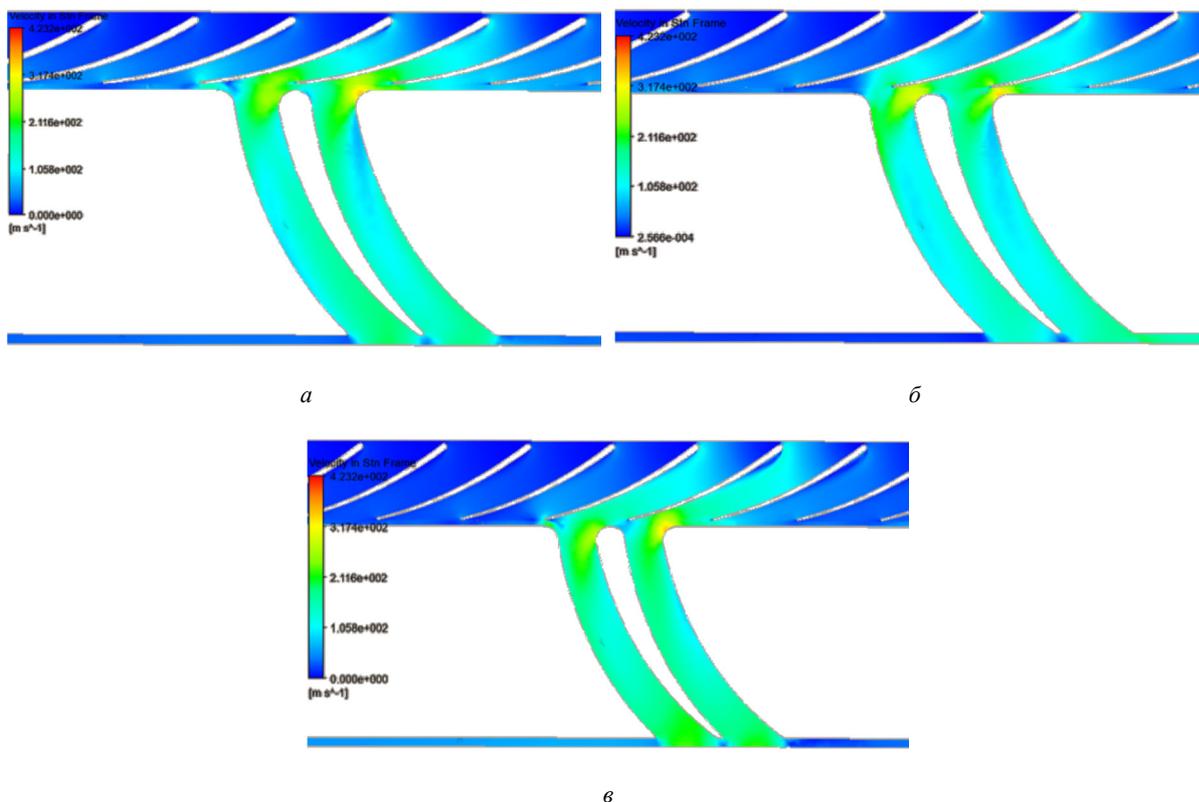


Рис. 2. Поле скоростей в проточной части турбомашины: *a* – при $\alpha_{1r} = 12,46^\circ$; *b* – при $\alpha_{1r} = 16,31^\circ$; *v* – при $\alpha_{1r} = 20,80^\circ$
Fig. 2. Velocity field in the flow part of the turbomachine: *a* – at $\alpha_{1r} = 12.46^\circ$; *b* – at $\alpha_{1r} = 16.31^\circ$; *v* – at $\alpha_{1r} = 20.80^\circ$

На рис. 2 отмечена зависимость коэффициента скорости сопел СА и КПД от угла выхода потока рабочего тела α_{1r} на некотором диапазоне значений u_1/C_0 . Снижение угла α_{1r} приводит к увеличению потерь на трении в соплах из-за увеличения протяженности канала, также повышаются кромочные

и концевые потери. Анализируя данные (табл. 2–4), можно прийти к выводу, что увеличение угла приводит к уменьшению потерь в сопловом канале до оптимального значения α_{1r} . Дальнейшее увеличение α_{1r} приводит к увеличению потерь.

Таблица 2

Table 2

Значения коэффициента скорости СА и КПД при $\alpha_{1r} = 12,46^\circ$ и $\varepsilon = 0,059$

Values of a velocity coefficient and efficiency of a nozzle apparatus at $\alpha_{1r} = 12.46^\circ$ and $\varepsilon = 0.059$

Параметр	Результат эксперимента					
	26 000	36 000	46 000	56 000	66 000	76 000
Частота вращения РК, мин ⁻¹	26 000	36 000	46 000	56 000	66 000	76 000
Давление на выходе из СА p_1 , МПа	0,15	0,15	0,15	0,151	0,151	0,152
Скорость потока на выходе из СА c_1 , м/с	173,984	174,843	175,111	173,123	171,818	169,007
Коэффициент скорости СА φ	0,807	0,811	0,812	0,812	0,806	0,802
Внутренний КПД, %	1,788	1,989	2,497	2,510	2,349	1,331

Таблица 3

Table 3

Значения коэффициента скорости СА и КПД при $\alpha_{1r} = 16,31^\circ$ и $\varepsilon = 0,059$

Values of a velocity coefficient of the nozzle apparatus and efficiency at $\alpha_{1r} = 16.31^\circ$ and $\varepsilon = 0.059$

Параметр	Результат эксперимента					
	26 000	36 000	46 000	56 000	66 000	76 000
Частота вращения РК, мин ⁻¹	26 000	36 000	46 000	56 000	66 000	76 000
Давление на выходе из СА p_1 , МПа	0,148	0,150	0,151	0,153	0,154	0,155
Скорость потока на выходе из СА c_1 , м/с	180,874	177,433	176,727	173,118	170,424	166,527
Коэффициент скорости СА φ	0,821	0,823	0,829	0,831	0,828	0,818
Внутренний КПД, %	2,412	3,213	3,443	3,814	3,453	1,862

Таблица 4

Table 4

Значения коэффициента скорости СА и КПД при $\alpha_{1r} = 20,80^\circ$ и $\varepsilon = 0,059$

Values of a velocity coefficient of the nozzle apparatus and efficiency at $\alpha_{1r} = 20.80^\circ$ and $\varepsilon = 0.059$

Параметр	Результат эксперимента					
	26 000	36 000	46 000	56 000	66 000	76 000
Частота вращения РК, мин ⁻¹	26 000	36 000	46 000	56 000	66 000	76 000
Давление на выходе из СА p_1 , МПа	0,151	0,151	0,151	0,152	0,152	0,152
Скорость потока на выходе из СА c_1 , м/с	174,018	174,543	175,723	173,138	171,989	170,729
Коэффициент скорости СА φ	0,816	0,819	0,824	0,821	0,816	0,810
Внутренний КПД, %	2,098	2,479	3,125	2,978	2,533	1,521

Результаты анализа эффективности исследуемых моделей доказывают, что КПД ступени будет несколько выше в ступени с оптимальным значением α_{1r} . По мере повышения частоты вращения РК в диапазоне 26 000–76 000 мин⁻¹ значение КПД также увеличивается, что свидетельствует о зависимости внутреннего КПД от u/C_0 .

Изменение размеров и ориентация лопаток может приводить к технологической погрешности при изготовлении, что способствует росту потерь и снижению внутреннего КПД. Согласно графикам на рис. 3 при расчете ступени нужно учитывать, что существуют оптимальные значения α_{1r} .

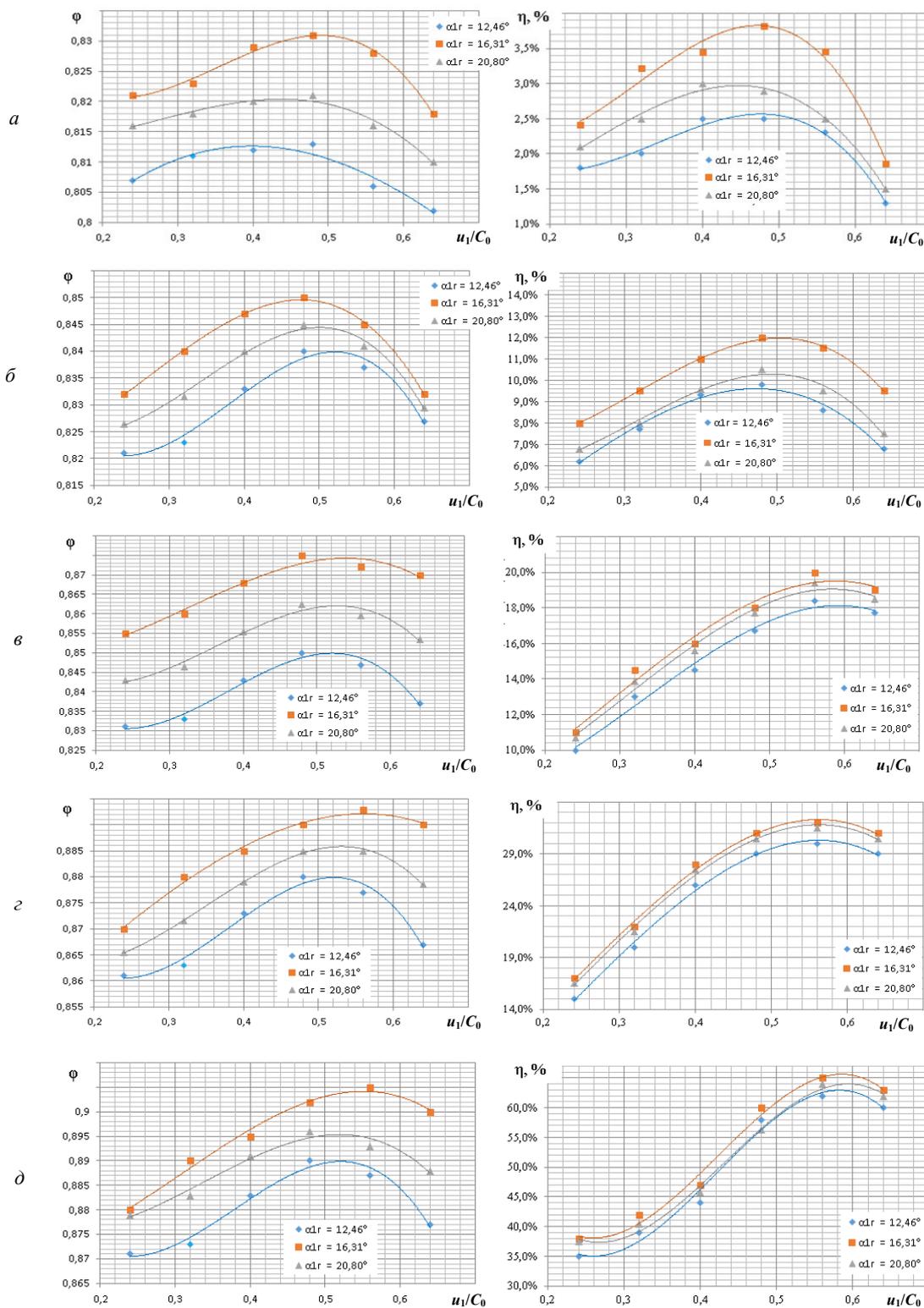


Рис. 3. Графики зависимости φ и η от углов выхода потока α_{1r} при различном значении u_1/C_0 и степени парциальности ступени ϵ : а – при $\epsilon = 0,059$; б – при $\epsilon = 0,118$; в – при $\epsilon = 0,206$; з – при $\epsilon = 0,412$; д – при $\epsilon = 1,00$

Fig. 3. Graphs of dependence φ and η on the angle of the flow output α_{1r} at different values of u_1/C_0 and the degree of partiality of the stage ϵ : а – at $\epsilon = 0,059$; б – at $\epsilon = 0,118$; в – at $\epsilon = 0,206$; з – at $\epsilon = 0,412$; д – at $\epsilon = 1,00$

Заключение

В результате проведенного эксперимента влияния угла выхода потока α_{1r} на эффективность ступени с частичным облопачиванием РК приходим к следующим выводам:

- получены значения коэффициентов скорости СА для турбинных ступеней с углом выхода потока $\alpha_{1r} = 12,46 \div 20,80^\circ$;
- снижение значения α_{1r} приводит к увеличению кромочных, концевых потерь и потерь на трении;

- повышение значения α_{1r} приводит к возрастанию профильных потерь и, как следствие, снижению значения φ ;
- получены значения КПД для ступеней с $\alpha_{1r} = 12,46 \div 20,80^\circ$;
- максимальным значениям КПД и коэффициента скорости φ соответствуют оптимальные значения α_{1r} ;
- для дальнейшего увеличения эффективности ступени необходимо рассмотреть мероприятия по совершенствованию проточной части РК.

Список источников

1. Соловьев А. В., Чиркова М. М., Попов Н. Ф. Повышение эффективности судовых энергетических установок // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2018. № 4. С. 101–106.
2. Ерофеев В. Л., Жуков В. А., Мельник О. В. О возможностях использования вторичных энергетических ресурсов в судовых ДВС // Вестн. гос. ун-та мор. и реч. флота им. адм. С. О. Макарова. 2017. Т. 9. № 3. С. 570–580.
3. Абул К. А. Оценка возможностей утилизиционных установок главных двигателей крупнотоннажных судов транспортного флота // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2009. № 1. С. 121–125.
4. Матвеев В. Т., Очеретяный В. А., Дологлонян А. В. Характеристики рабочих процессов воздушнозависимых одноконтурных микрогазотурбинных установок для подводной техники // Вестн. гос. ун-та мор. и реч. флота им. адм. С. О. Макарова. 2017. Т. 9. № 3. С. 612–618.
5. Елифанов А. А., Кириллов А. И., Рассохин В. А. Расчет трехмерного течения в ступенях малорасходных турбин // Науч.-техн. вед. Санкт-Петербург. гос. политехн. ун-та. 2012. № 1 (142). С. 65–70.
6. Забелин Н. А., Раков Г. Л., Рассохин В. А., Себедев А. А., Смирнов М. В. Исследование особенностей течения в малорасходных турбинных ступенях конструкции ЛПИ // Науч.-техн. вед. Санкт-Петербург. гос. политехн. ун-та. 2013. № 1 (166). С. 45–53.
7. Нгуен А. К., Лапшин К. Л. Характеристики и структура потока турбинной ступени с отрицательным градиентом степени реактивности // Науч.-техн. вед.

1. Санкт-Петербург. гос. политехн. ун-та. 2016. № 2 (243). С. 163–173.
8. Rassokhin V., Zabelin N., Kunte H., Seume J., Olenikov S., Cherkasova M., Sebelev A. The design of micro-turbine 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. P. 139–155.
9. Rakov G., Rassokhin V., Zabelin N., Olenikov S., Sebelev A., Sukhanov A., Schislyaev S. 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 and Science Education. 2016. V. 11. N. 18. P. 11721–11733.
10. Крюков А. А. Численное моделирование коэффициента скорости соплового аппарата малорасходной турбины // Вестн. гос. ун-та мор. и реч. флота им. адм. С. О. Макарова. 2021. Т. 13. № 6. С. 849–857.
11. Крюков А. А., Чехранов С. В. Сравнение значений коэффициентов скорости в турбинной ступени с частичным облопачиванием рабочего колеса // Вестн. гос. ун-та мор. и реч. флота им. адм. С. О. Макарова. 2021. Т. 13. № 2. С. 257–265.
12. Крюков А. А., Чехранов С. В. Трехмерное численное моделирование малорасходной центробежной турбины с частичным облопачиванием рабочего колеса // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2021. № 1. С. 74–80.

References

1. Solov'ev A. V., Chirkova M. M., Popov N. F. Povyshenie effektivnosti sudovykh energeticheskikh ustanovok [Improving efficiency of ship power plants]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2018, no. 4, pp. 101-106.
2. Erofeev V. L., Zhukov V. A., Mel'nik O. V. O vozmozhnostiakh ispol'zovaniia vtorichnykh energeticheskikh resursov v sudovykh DVS [On possibilities of using secondary energy resources in ship internal combustion engines]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*, 2017, vol. 9, no. 3, pp. 570-580.
3. Abul K. A. Otsenka vozmozhnostei utilizatsionnykh ustanovok glavnykh dvigatelei krupnotonnazhnykh sudov transportnogo flota [Evaluation of possibilities of recycling

1. units of main engines on large-tonnage ships of transport fleet]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2009, no. 1, pp. 121-125.
4. Matveenko V. T., Ocheretianyi V. A., Dologlonian A. V. Kharakteristiki rabochikh protsessov vozdukhnezavisimykh odnokonturnykh mikrogazoturbinnnykh ustanovok dlia podvodnoi tekhniki [Characteristics of working processes in air-independent single-circuit micro gas turbines for underwater equipment]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*, 2017, vol. 9, no. 3, pp. 612-618.
5. Epifanov A. A., Kirillov A. I., Rassokhin V. A. Raschet trekhmernogo techeniya v stupeniakh maloraskhodnykh turbin [Calculation of three-dimensional flow in stages

of low-consuming turbines]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*, 2012, no. 1 (142), pp. 65-70.

6. Zabelin N. A., Rakov G. L., Rassokhin V. A., Sebelev A. A., Smirnov M. V. Issledovanie osobennosti techeniia v maloraskhodnykh turbinnykh stupeniakh konstruksii LPI [Investigation of flow characteristics in low-consuming turbine stages of LPI design]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*, 2013, no. 1 (166), pp. 45-53.

7. Nguen A. K., Lapshin K. L. Kharakteristiki i struktura potoka turbinnoi stupeni s otritsatel'nyim gradientom stepeni reaktivnosti [Characteristics and flow structure of turbine stage with negative gradient of reactivity degree]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*, 2016, no. 2 (243), pp. 163-173.

8. Rassokhin V., Zabelin N., Kunte H., Seume J., Olenikov S., Cherkasova M., Sebelev A. The design of micro-turbine 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. Pp. 139-155.

9. Rakov G., Rassokhin V., Zabelin N., Olenikov S., Sebelev A., Sukhanov A., Schislyaev S. 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 and Science Education*, 2016, vol. 11, no. 18, pp. 11721-11733.

10. Kriukov A. A. Chislennoe modelirovanie koeffitsienta skorosti soplovogo apparata maloraskhodnoi turbiny [Numerical modeling of speed coefficient of low-consuming turbine nozzle apparatus]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*, 2021, vol. 13, no. 6, pp. 849-857.

11. Kriukov A. A., Chekhranov S. V. Sravnenie znachenii koeffitsientov skorosti v turbinnoi stupeni s chastichnym oblopachivaniem rabocheho kola [Comparing values of velocity coefficients in turbine stage with runner partial blading]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*, 2021, vol. 13, no. 2, pp. 257-265.

12. Kriukov A. A., Chekhranov S. V. Trekhmernoe chislennoe modelirovanie maloraskhodnoi tsentrostremitel'noi turbiny s chastichnym oblopachivaniem rabocheho kola [Three-dimensional numerical simulation of low-consuming inflow turbine with runner partial blading]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaiia tekhnika i tekhnologiya*, 2021, no. 1, pp. 74-80.

Статья поступила в редакцию 23.01.2023; одобрена после рецензирования 03.02.2023; принята к публикации 10.02.2023
The article was submitted 23.01.2023; approved after reviewing 03.02.2023; accepted for publication 10.02.2023

Информация об авторе / Information about the author

Алексей Алексеевич Крюков – старший преподаватель кафедры инженерных дисциплин; Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет; Aleksey902@mail.ru

Aleksei A. Kriukov – Senior Lecturer of the Department of Engineering Disciplines; Far Eastern State Technical Fisheries University; Aleksey902@mail.ru

