

Ю. В. Соломахин, В. М. Акуленко, А. А. Яценко

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАРЦИАЛЬНЫХ МИКРОТУРБИН С МАЛЫМ УГЛОМ ВЫХОДА СОПЕЛ

Предлагаются к рассмотрению результаты экспериментального исследования конструкции осевых и центробежных одновенечных ступеней газовых микротурбин с большим относительным шагом лопаток рабочего колеса и малыми конструктивными углами выхода сопел соплового аппарата в случае, когда уменьшение угла выхода сопел соплового аппарата не решает проблемы недостаточного расхода газа для подвода последнего к рабочему колесу по всей окружности поверхности, занятой рабочими лопатками, что приводит к необходимости выполнять микротурбинные ступени с парциальным подводом газа к рабочему колесу. Выявлены случаи, при которых допустима отрицательная степень реактивности; определена степень влияния на эффективность изменения теплоперепада на ступень с изменением степени парциальности, что делает выбор способа изменения режима работы микротурбины более обоснованным.

Ключевые слова: микротурбина, рабочее колесо, степень парциальности, степень реактивности, эффективность.

Введение

Работа посвящена решению такой проблемы судовой энергетики, как недостаточно высокая эффективность работы турбин для вспомогательных судовых механизмов, а также турбин, работающих в качестве главных двигателей в случае установки их на автономные морские аппараты [1–5]. Проблема заключается в ограниченном расходе рабочего тела, подаваемого на турбину, что не позволяет выполнить последнюю в оптимальном диапазоне конструктивных и режимных параметров.

Развитие производства судовых, как и любых других, транспортных двигателей тесно связано с совершенствованием их конструкции. Исторически в морских и наземных транспортных агрегатах в качестве приводных двигателей использовались двигатели внутреннего сгорания. Связано это, в первую очередь, с простотой передачи энергии двигателя для приведения в движение транспортного средства. Кроме того, двигатели внутреннего сгорания обладают удобными для использования на транспорте механическими характеристиками. Однако подобные двигатели имеют и ряд недостатков, связанных, в основном, с повышенным расходом топлива на нерасчетных режимах и повышенным уровнем вредных выбросов в атмосферу в этом случае. Кроме того, подобные двигатели имеют достаточно большие габариты.

В последнее время появились работы, в которых показана перспективность применения газовых турбин в различных качествах (в том числе в качестве генератора для зарядки аккумуляторов, предназначенных для комбинированных энергетических установок морских аппаратов и автотранспортных средств) [6]. Основным недостатком подобных турбин является их недостаточно высокая эффективность, поэтому в настоящее время проводятся работы, связанные с совершенствованием энергетических характеристик микротурбин [7–9]. В работах [10, 11] приведены результаты исследований подобных турбин, показана перспективность выбранного направления и доказана связь конфигурации проточной части турбины с ее эффективностью. Кроме того, проводимые (начиная с 1978 г. и по настоящее время) в Санкт-Петербургском политехническом университете (СПбПУ) экспериментальные работы с серией малорасходных турбин с полным подводом газа к рабочему колесу, имеющему большой относительный шаг лопаток, доказали целесообразность применения таких турбин в качестве двигателей энергетических установок для транспорта. Одним из основных требований в этом случае является обеспечение достаточно большой эффективности установки на режимах, отличных от расчетного. Недостаточное количество экспериментальных работ в этом направлении в последнее время несколько компенсировано исследованиями, проведенными различными авторами [12–16].

Для получения возможности проектировать подобные турбины, для работы при различных режимах, с достаточной точностью необходимо разработать методику расчета таких турбин

на основе экспериментальных и теоретических исследований на режимах, отличных от расчетного. При этом необходимо знание функции изменения как потерь кинетической энергии в рабочем колесе и сопловом аппарате, так и дополнительных потерь, вызванных переходом на новый режим работы. С этой целью были разработаны новые конструкции элементов проточной части турбин и выполнены исследования, результаты которых изложены в [17–25].

Описание экспериментальной модели

Объектом исследований стали турбинные одновенечные ступени осевого и центробежного типов, акцент в этих исследованиях был сделан на совершенствовании методов профилирования сопел соплового аппарата. Выбор был обусловлен тем, что эффективность соплового аппарата наиболее сильно влияет на КПД всей турбины, а сопла сопловых аппаратов, спрофилированных традиционным способом, обладают низким значением коэффициента скорости, что связано с такой спецификой микротурбин, как малые размеры и большая кривизна корневой и периферийной поверхностей проточной части сопел, в том числе и косоуго среза. С этой целью в работе [17] был предложен новый метод профилирования сопел, сочетающий в себе преимущества как осесимметричных сопел (отсутствие концевых потерь кинетической энергии), так и сопел с прямоугольной формой нормальных сечений на протяжении всей проточной части, начиная от входного участка и заканчивая выходом в косой срез, который выполнен традиционно, что оптимально стыкуется с входом в проточную часть каналов рабочих колес (рис. 1).

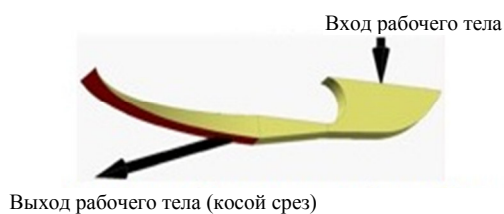


Рис. 1. Конфигурация проточной части сопел сопловых аппаратов [17]

Экспериментальные исследования проводились на моделях, разработанных и изготовленных в лаборатории кафедры «Турбины, гидромашин и авиационные двигатели» СПбПУ. Выбор размеров экспериментальных моделей обусловлен размерами натурной турбинной ступени и имеющимися воздухопроводными средствами лаборатории (рис. 2, 3).

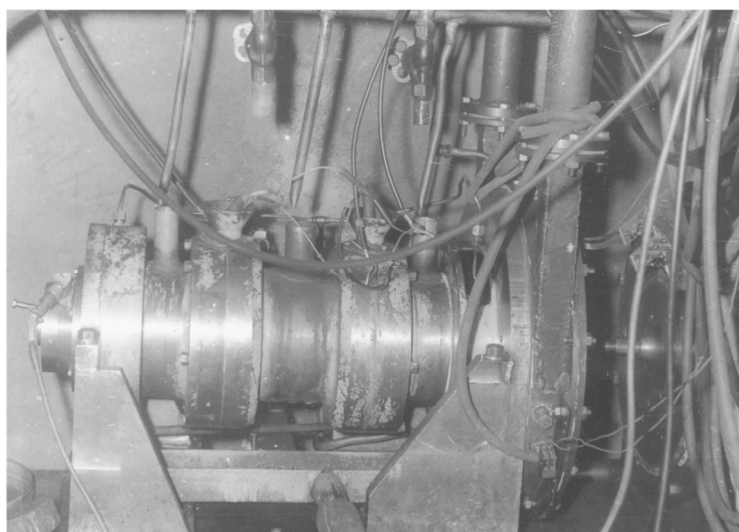


Рис. 2. Внешний вид экспериментальной установки для исследования турбин

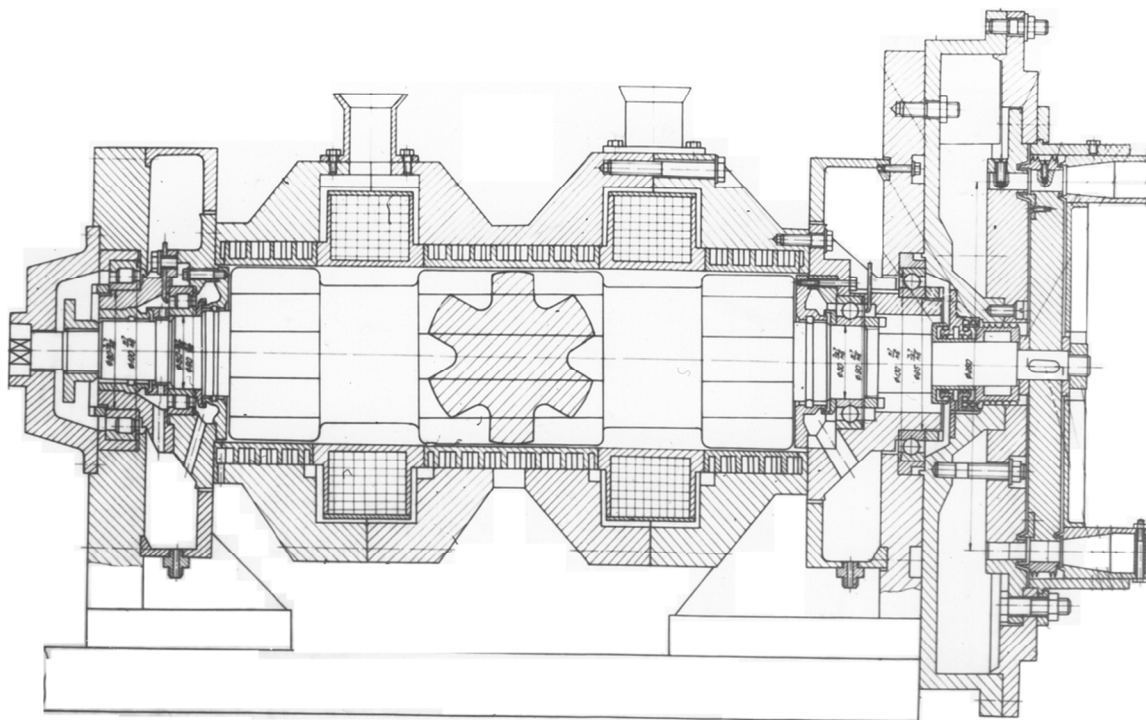


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для исследования турбин

Результаты исследования

В ходе исследования по выявлению степени влияния потерь кинетической энергии рабочего тела из-за парциального подвода газа к лопаткам рабочего колеса осевой газовой турбины с соплами прямоугольного сечения установлено, что снижение степени парциальности ступени приводит к значительному снижению эффективности у турбин рассматриваемого типа. В связи с этим был сделан вывод том, что в подобных турбинах снижение угла выхода сопел соплового аппарата до значений существенно меньших, чем рекомендованы в литературе, обусловлено меньшим снижением уровня эффективности турбинной ступени, чем введение парциального подвода.

Установлено, что для сохранения достаточно высокого уровня эффективности микротурбинной ступени межлопаточные каналы рабочих колес должны выполняться диффузорными, причем степень диффузорности выбирается такой, чтобы гарантировать предотвращение «запирания» каналов рабочего колеса и в то же время не допустить отрыва потока от поверхности рабочих лопаток. При этом ступень может иметь отрицательную реактивность.

Результаты экспериментальных исследований зависимости эффективности осевой парциальной газовой турбины с осесимметричными соплами от степени парциальности, при различных значениях давления перед соплами соплового аппарата, показали снижение эффективности микротурбинной ступени при условии снижения степени парциальности, что подтвердило выводы различных авторов, сделанные ранее. Однако в данном конкретном случае изменение теплосоперпада на ступень влияет на эффективность ступени сильнее, чем изменение значения степени парциальности.

В связи с большим распространением центростремительных газовых микротурбин с ними также были проведены исследования, в ходе которых установлено, что уменьшение эффективности при снижении степени подвода газа к рабочему колесу происходит наиболее интенсивно при отношении давления перед соплами соплового аппарата к давлению *за* ступенью в области двух. С увеличением перепада давлений на ступень относительное снижение КПД уменьшается. Основной отличительной особенностью работы радиальных турбинных ступеней является наличие поля центробежных сил, а также так называемого компрессорного эффекта. При отсутствии течения в канале рабочего колеса разность давлений *перед* и *за* ним равна нулю. На неак-

тивном участке под действием центробежных сил возможно даже обратное движение газа. Вероятность развития этого эффекта в большой мере определяет потери при парциальном подводе и зависит от времени прохождения рабочих лопаток на неактивной дуге. Другими словами, при высоких частотах вращения ротора время прохождения рабочих лопаток на неактивной дуге будет незначительным. Добиться высоких частот вращения вала возможно при использовании подшипников на газовой смазке, поддерживающих вал [26].

Необходимо увеличивать количество дуг подвода рабочего тела к лопаткам рабочего колеса, т. к. при этом уменьшается величина «теневых» зон и одновременно снижается интенсивность компрессорного эффекта. При увеличении степени радиальности компрессорный эффект увеличивается. Следует ожидать большего положительного эффекта от увеличения дуг подвода для ступеней с меньшей степенью радиальности.

Выводы и рекомендации

1. Результаты проведенного исследования стали подтверждением гипотезы о том, что использование специфической конструкции ступени, обусловленное малыми углами выхода потока газа, может привести к несоответствию расчетных зависимостей потерь энергии, связанных с парциальным подводом, которые рассмотрены в литературе для ступеней традиционных конструкций.

2. В случае недостаточного расхода газа для обеспечения полного подвода его к рабочему колесу, при сохранении приемлемых размеров проточных частей сопел сопловых аппаратов и межлопаточных каналов рабочего колеса, уменьшение конструктивного выходного угла сопел соплового аппарата является предпочтительнее уменьшения дуги подвода газа к рабочему колесу за счет введения степени парциальности при ее отсутствии. И даже в том случае, когда избежать парциального подвода газа к рабочему колесу не удастся, величина неактивной дуги подвода газа к рабочему колесу гораздо меньше при использовании малых углов выхода сопел в сравнении с применением традиционных углов, что положительно влияет на эффективность ступени.

3. При необходимости изменения мощности осевой микротурбины во время работы сопловое регулирование предпочтительнее дроссельного. Несмотря на увеличение потерь кинетической энергии, связанных с парциальностью турбинной ступени, значение этого увеличения существенно меньше, чем рост потерь кинетической энергии, связанный с нерасчетным режимом самих сопел соплового аппарата.

4. Применительно к центростремительным турбинам сопловое регулирование предпочтительнее дроссельного при околозвуковых скоростях выхода потока газа из сопел сопловых аппаратов, при сверхкритических значениях теплоперепада на соплах сопловых аппаратов дроссельное регулирование оказывает менее негативное влияние на эффективность ступени, чем сопловое.

5. Несмотря на возможность выхода на режим работы с отрицательной степенью реактивности, что в целом нежелательно, межлопаточные каналы рабочих колес необходимо выполнять диффузорными для обеспечения свободного протекания газа через них, это позволит избежать падения эффективности ступени в случае незначительного изменения условий работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Романова Е. А., Романов А. Д. История развития зарубежных энергетических установок для подводных объектов на основе топливных элементов // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2015. № 1. С. 84–90.
2. Буров Д. С., Зеленов С. Н., Семашко П. В., Хабибуллина А. Р. Эжекторная установка с авиационным газотурбинным двигателем для ледокольной платформы на воздушной подушке // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2014. № 2. С. 46–51.
3. Иванов В. А. Повышение эффективности стационарных и судовых газотурбинных установок // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2012. № 2. С. 76–80.
4. Каргин С. А. Проблемы повышения энергетической эффективности транспортных энергетических установок // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2011. № 2. С. 84–90.

5. Иванов В. А., Ильин А. К. Результаты оптимизации сложных термодинамических циклов газотурбинных установок // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2009. № 2. С. 139–145.
6. Арав Б. Л., Бен Хаим М., Рассохин В. А., Беседин С. Н., Келлер А. В. Микрогазотурбинные двигатели-генераторы как основа комбинированных энергетических установок автотранспортных средств // Автомобильная промышленность. 2011. № 7. С. 9–13.
7. Бенько А. В., Соломахин Ю. В. Состояние вопроса в области применения методов математического моделирования для определения эффективности малорасходных турбин // Научное обозрение. 2014. № 3. С. 130–134.
8. Соломахин Ю. В., Бенько А. В. Эффективность турбин с большим относительным шагом лопаток на частичных режимах // Научное обозрение. 2015. № 16. С. 153–156.
9. Алексеев Г. В., Фершалов М. Ю., Фершалов Ю. Я., Луценко В. Т. Обоснование и выбор метода исследования степени реактивности малорасходных турбин // Научное обозрение. 2012. № 2. С. 322–331.
10. Фершалов Ю. Я. Моделирование, анализ и совершенствование газодинамических характеристик судовых осевых сверхзвуковых малорасходных турбинных ступеней: дис. ... д-ра техн. наук. Владивосток: Дальневост. федер. ун-т, 2015. 355 с.
11. Фершалов Ю. Я. Моделирование, анализ и совершенствование газодинамических характеристик судовых осевых сверхзвуковых малорасходных турбинных ступеней: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Владивосток: Дальневост. федер. ун-т, 2015. 48 с.
12. Алексеев Г. В., Фершалов М. Ю., Фершалов Ю. Я., Луценко В. Т., Якубовский Ю. В., Карастелёв Б. Я., Кончаков Е. И. Влияние конструктивных факторов на степень реактивности малорасходных турбинных ступеней // Научное обозрение. 2012. № 2. С. 346–357.
13. Фершалов Ю. Я., Фершалов А. Ю., Фершалов М. Ю. Влияние степени расширения сопел с малым углом выхода на эффективность сопловых аппаратов малорасходных турбин // Судостроение. 2012. № 1. С. 39–41.
14. Алексеев Г. В., Фершалов М. Ю., Фершалов Ю. Я., Луценко В. Т. Влияние режимных факторов на степень реактивности малорасходных турбинных ступеней // Научное обозрение. 2012. № 2. С. 332–345.
15. Фершалов Ю. Я., Ханькович И. Н., Минаев А. Н., Карастелёв Б. Я., Якубовский Ю. В., Кончаков Е. И. Влияние режимных факторов на КПД малорасходных турбинных ступеней // Научное обозрение. 2012. № 5. С. 425–439.
16. Фершалов Ю. Я., Ханькович И. Н., Минаев А. Н., Карастелёв Б. Я., Якубовский Ю. В., Кончаков Е. И. Влияние конструктивных факторов на КПД малорасходных турбинных ступеней // Научное обозрение. 2012. № 5. С. 440–450.
17. Пат. РФ № 2232902. Сопловой аппарат осевой турбины / Фершалов Ю. Я., Рассохин В. А.; опубл. 05.07.2002.
18. Фершалов Ю. Я., Фершалов А. Ю. Сопловой аппарат осевой малорасходной турбины // Судостроение. 2010. № 3. С. 46–47.
19. Фершалов Ю. Я. Разработка моделей малорасходных турбинных ступеней и стенда для исследования сопловых аппаратов // Судостроение. 2004. № 6. С. 42–46.
20. Fershalov Yu. Ya., Sazonov T. V. Experimental research of the nozzles // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 915–916. P. 345–348.
21. Фершалов Ю. Я., Чехранов С. В. Статические испытания сопловых аппаратов с малым углом выхода потока // Судостроение. 2005. № 5. С. 54–56.
22. Фершалов Ю. Я. Совершенствование сверхзвуковых осевых малорасходных турбин: дис. ... канд. техн. наук. Владивосток: Дальневост. федер. ун-т, 2000. 153 с.
23. Фершалов А. Ю., Грибиниченко М. В., Фершалов Ю. Я. Эффективность рабочих колес малорасходных турбин с большим углом поворота потока // Науч.-техн. ведом. Санкт-Петерб. гос. политехн. ун-та. 2011. № 117. С. 52–55.
24. Соломахин Ю. В., Бенько А. В. Экспериментальные исследования малорасходных турбин с малым углом выхода потока на номинальном и переменном режимах работы // Научное обозрение. 2015. № 7. С. 200–208.
25. Соломахин Ю. В., Бенько А. В., Китаев М. В. Эффективность осевых малорасходных турбин и их элементов при дроссельном регулировании // Научное обозрение. 2014. № 5. С. 145–149.
26. Грибиниченко М. В., Куренский А. В., Фершалов Ю. Я. Обобщенная математическая модель осевых подшипников с газовой смазкой элементов судовых энергетических установок // Морские интеллектуальные технологии. 2011. № 1–1. С. 21–23.

Статья поступила в редакцию 08.06.2017

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Соломахин Юрий Васильевич — Россия, 690014, Владивосток; Владивостокский государственный университет экономики и сервиса; канд. техн. наук, доцент; доцент кафедры транспортных процессов и технологий; y.solomahin@mail.ru.

Акуленко Вера Михайловна — Россия, 690091, Владивосток; Дальневосточный федеральный университет; канд. техн. наук; доцент кафедры электроэнергетики и электротехники; vm.akulenko@mail.ru.

Яценко Александр Алексеевич — Россия 690014, Владивосток; Владивостокский государственный университет экономики и сервиса; доцент кафедры транспортных процессов и технологий; Jatsenko125@yandex.ru.



Y. V. Solomahin, V. M. Akulenko, A. A. Yatsenko

CHARACTERISTICS OF PARTIAL MICROTURBINES WITH NOZZLES HAVING SMALL OUTLET ANGLE

Abstract. The article presents the results of the pilot study of gas microturbine constructions both axial and centripetal, with a relatively big pitch of impeller blade and nozzles with small outlet angles. The case is that lowering the angle of a nozzle doesn't solve the problem of low gas consumption when it is necessary to supply gas to the turbine wheel and to distribute it around blades. This makes execute microturbine steps with partial gas supply to the wheel. There were revealed instances when negative degree of reactivity was permitted. There has been found a degree of the impact to heat drop to the step with a change of partition, which makes the choice of operation mode of the microturbine well grounded.

Key words: microturbine, wheel, partition degree, reactivity degree, efficiency.

REFERENCES

1. Romanova E. A., Romanov A. D. Istoriia razvitiia zarubezhnykh energeticheskikh ustanovok dlia podvodnykh ob'ektov na osnove toplivnykh elementov [History of developing foreign electric power plants for underwater facilities based on fuel cells]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaia tekhnika i tekhnologiia*, 2015, no. 1, pp. 84-90.
2. Burov D. S., Zelenov S. N., Semashko P. V., Khabibullina A. R. Ezhektornaia ustanovka s aviatsionnym gazoturbinnym dvigatelem dlia ledokol'noi platformy na vozduшной podushke [Ejector with aero gas-turbine engine for an ice-breaker on air cushion]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaia tekhnika i tekhnologiia*, 2014, no. 2, pp. 46-51.
3. Ivanov V. A. Povyshenie effektivnosti statsionarnykh i sudovykh gazoturbinnnykh ustanovok [Raising efficiency of stationary and ship gas-turbine plants]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaia tekhnika i tekhnologiia*, 2012, no. 2, pp. 76-80.
4. Kargin S. A. Problemy povysheniia energeticheskoi effektivnosti transportnykh energeticheskikh ustanovok [Problems of improving energy efficiency of transport power plants]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaia tekhnika i tekhnologiia*, 2011, no. 2, pp. 84-90.
5. Ivanov V. A., Il'in A. K. Rezul'taty optimizatsii slozhnykh termodinamicheskikh tsiklov gazoturbinnnykh ustanovok [Optimization results of complex thermo-dynamic cycles of gas-turbine plants]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaia tekhnika i tekhnologiia*, 2009, no. 2, pp. 139-145.
6. Arav B. L., Ben Khaim M., Rassokhin V. A., Besedin S. N., Keller A. V. Mikro-gazoturbinye dvigateli-generatory kak osnova kombinirovannykh energeticheskikh ustanovok avtotransportnykh sredstv [Micro-gas-turbine generators as basic combined power plants for road transport]. *Avtomobil'naia promyshlennost'*, 2011, no. 7, pp. 9-13.

7. Ben'ko A. V., Solomakhin Iu. V. Sostoianie voprosa v oblasti primeneniia metodov matematicheskogo modelirovaniia dlia opredeleniia effektivnosti maloraskhodnykh turbin [Problems of mathematical modelling in determining the efficiency of slow-rate turbines]. *Nauchnoe obozrenie*, 2014, no. 3, pp. 130-134.
8. Solomakhin Iu. V., Ben'ko A. V. Effektivnost' turbin s bol'shim otnositel'nym shagom lopatok na chas-tichnykh rezhimakh [The efficiency of turbines with great relative pitch of the blades on partial modes]. *Nauchnoe obozrenie*, 2015, no. 16, pp. 153-156.
9. Alekseev G. V., Fershalov M. Iu., Fershalov Iu. Ia., Lutsenko V. T. Obosnovanie i vybor metoda issledo-vaniia stepeni reaktivnosti maloraskhodnykh turbin [Justification and selection of the technique for analyzing reactivity of slow-rate turbines]. *Nauchnoe obozrenie*, 2012, no. 2, pp. 322-331.
10. Fershalov Iu. Ia. *Modelirovanie, analiz i sovershenstvovanie gazodinamicheskikh kharakteristik su-dovykh osevykh sverkhzvukovykh maloraskhodnykh turbinnykh stupenei. Dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Modelling, analysis and improving gas-dynamic characteristics of the ship axial supersonic slow-rate turbine steps. Dis. ... Doc. Tech. Sci.]. Vladivostok, Dal'nevostochnyi federal'nyi universitet, 2015. 355 p.
11. Fershalov Iu. Ia. *Modelirovanie, analiz i sovershenstvovanie gazodinamicheskikh kharakteristik su-dovykh osevykh sverkhzvukovykh maloraskhodnykh turbinnykh stupenei. Avtoreferat dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Modelling, analysis and improving gas dynamic characteristics of the ship axial supersonic slow-rate turbine steps. Thesis abstract...Doc. Tech. Sci.]. Vladivostok, Dal'nevostochnyi federal'nyi universitet, 2015. 48 p.
12. Alekseev G. V., Fershalov M. Iu., Fershalov Iu. Ia., Lutsenko V. T., Iakubovskii Iu. V., Karastelev B. Ia., Konchakov E. I. Vliianie konstruktivnykh faktorov na stepen' reaktivnosti maloraskhodnykh turbinnykh stupenei [The impact of design factors on reactivity degree of slow-rate turbine steps]. *Nauchnoe obozrenie*, 2012, no. 2, pp. 346-357.
13. Fershalov Iu. Ia., Fershalov A. Iu., Fershalov M. Iu. Vliianie stepeni rasshireniia sopel s malym uglom vykhoda na effektivnost' soplovykh apparatov maloraskhodnykh turbin [Influence of a low angle outlet nozzle extension on efficiency of a nozzle block of slow-rate turbines]. *Sudostroenie*, 2012, no. 1, pp. 39-41.
14. Alekseev G. V., Fershalov M. Iu., Fershalov Iu. Ia., Lutsenko V. T. Vliianie rezhimnykh faktorov na stepen' reaktivnosti maloraskhodnykh turbinnykh stupenei [Influence of the regime factors on reactivity of slow-rate turbine steps]. *Nauchnoe obozrenie*, 2012, no. 2, pp. 332-345.
15. Fershalov Iu. Ia., Khan'kovich I. N., Minaev A. N., Karastelev B. Ia., Iakubovskii Iu. V., Konchakov E. I. Vliianie rezhimnykh faktorov na KPD maloraskhodnykh turbinnykh stupenei [Influence of regime factors on the efficiency of slow-rate turbine steps]. *Nauchnoe obozrenie*, 2012, no. 5, pp. 425-439.
16. Fershalov Iu. Ia., Khan'kovich I. N., Minaev A. N., Karastelev B. Ia., Iakubovskii Iu. V., Konchakov E. I. Vliianie konstruktivnykh faktorov na KPD maloraskhodnykh turbinnykh stupenei [Influence of design fac-tors on the efficiency of slow-rate turbine steps]. *Nauchnoe obozrenie*, 2012, no. 5, pp. 440-450.
17. Fershalov Iu. Ia., Rassokhin V. A. *Soplovoi apparat osevoi turbiny* [Nozzle block of an axial turbine]. Patent RF, no. 2232902, 05.07.2002.
18. Fershalov Iu. Ia., Fershalov A. Iu. Soplovoi apparat osevoi maloraskhodnoi turbiny [Nozzle block of an axial slow-rate turbine]. *Sudostroenie*, 2010, no. 3, pp. 46-47.
19. Fershalov Iu. Ia. Razrabotka modelei maloraskhodnykh turbinnykh stupenei i stenda dlia issledovaniia soplovykh apparatov [Developing models of slow-rate turbine steps and a stand for nozzle blocks]. *Sudostroenie*, 2004, no. 6, pp. 42-46.
20. Fershalov Yu. Ya., Sazonov T. V. Experimental research of the nozzles. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 915-916, pp. 345-348.
21. Fershalov Iu. Ia., Chekhranov S. V. Sticheskie ispytaniia soplovykh apparatov s malym uglom vykhoda potoka [Statistics tests for nozzle blocks with a low angle flow outlet]. *Sudostroenie*, 2005, no. 5, pp. 54-56.
22. Fershalov Iu. Ia. *Sovershenstvovanie sverkhzvukovykh osevykh maloraskhodnykh turbin. Dis. ... kand. tekhn. nauk* [Improving supersonic axial slow-rate turbines. Dis. ...Cand. Tech. Sci.]. Vladivostok, Dal'nevostochnyi federal'nyi universitet, 2000. 153 p.
23. Fershalov A. Iu., Gribinichenko M. V., Fershalov Iu. Ia. Effektivnost' rabochikh koles maloraskhodnykh turbin s bol'shim uglom povorota potoka [Efficiency of turbine wheels in slow-rate turbines with a big angle flow turn]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universi-teta*, 2011, no. 117, pp. 52-55.
24. Solomakhin Iu. V., Ben'ko A. V. Eksperimental'nye issledovaniia maloraskhodnykh turbin s malym uglom vykhoda potoka na nominal'nom i peremennom rezhimakh raboty [Experimental studies of slow-rate turbines with low angle flow outlet at nominal and varying operating modes]. *Nauchnoe obozrenie*, 2015, no. 7, pp. 200-208.

25. Solomakhin Iu. V., Ben'ko A. V., Kitaev M. V. Effektivnost' osevykh maloraskhodnykh turbin i ikh elementov pri drossel'nom regulirovanii [Efficiency of axial slow-rate turbines and their elements at throttle regulation]. *Nauchnoe obozrenie*, 2014, no. 5, pp. 145-149.

26. Gribinichenko M. V., Kurenskii A. V., Fershalov Iu. Ia. Obobshchennaia matematicheskaia model' osevykh podshipnikov s gazovoi smazkoi elementov sudovykh energeticheskikh ustanovok [Generalized mathematical model of axial bearings with gas-film lubrication of the elements of the ship power plants]. *Morskie intelektual'nye tekhnologii*, 2011, no. 1-1, pp. 21-23.

The article submitted to the editors 08.06.2017

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Solomahin Yuri Vasilyevich – Russia, 690014, Vladivostok; Vladivostok State University of Economics and Service; Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Transport Processes and Technologies; y.solomahin@mail.ru.

Akulenko Vera Mikhailovna – Russia 690091, Vladivostok; Far Eastern Federal University; Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department of Electric Power Engineering; vm.akulenko@mail.ru.

Yatsenko Alexander Alekseevich – Russia, 690014, Vladivostok; Vladivostok State University of Economics and Service; Assistant Professor of the Department of Transport Processes and Technologies; Jatcenko125@yandex.ru.

