

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОСЕВЫХ МАЛОРАСХОДНЫХ ТУРБИН И ИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ДРОССЕЛЬНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ

Ю. В. СОЛОМАХИН, А. В. БЕНЬКО, М. В. КИТАЕВ***

ФГБОУ ВПО «Владивостокский государственный университет экономики и сервиса»,

**ООО «Аривист – Консалт»,*

***Инженерная школа ФГАОУ ВПО «Дальневосточный федеральный университет»,*

г. Владивосток

Аннотация. Рассмотрено направление решения проблемы повышения эффективности малорасходных турбин с большим относительным шагом лопаток.

Ключевые слова: малорасходная турбина, сопла, рабочее колесо, рабочее тело, эффективность, степень реактивности.

В последнее время малорасходные турбины (МРТ) находят все более широкое применение в практике мирового турбостроения в качестве турбоприводов для автономных транспортных средств. Это объясняется соответствием особенностей работы МРТ требованиям, предъявляемым к такого рода двигателям: высокие начальные параметры рабочего тела (РТ) обеспечивают необходимую мощность при ограниченных габаритных размерах; относительно толстые лопатки рабочих колес (РК) и сопловых аппаратов (СА) при малых значениях их диаметров и высот проточных частей обеспечивают выполнение требований прочности турбины. Однако у рассматриваемых турбин существует ряд негативных особенностей, к которым можно отнести: малые размеры проточной части и парциальный подвод РТ к РК (из-за малых объемных расходов РТ), приводящих к значительным потерям кинетической энергии; значительные частоты вращения РК вызывают проблемы с выбором подшипников; высокие скорости РТ в проточной части при больших отношениях давлений на ступень МРТ приводят к неоптимальным условиям работы СА и РК; относительно большие зазоры в области между СА и РК и, соответственно, вентиляция относительно большой массы РТ в этой области делают проблематичным оценку параметров РТ в ней, что усугубляет проблему определения оптимального профиля проточных частей СА и РК;

высокое влияние на течения РТ в проточной части технологических отклонений и погрешности изготовления. Учитывая это, современная тенденция создания МРТ, работающих на нескольких частичных режимах, кроме основного, приводит к необходимости разработки новых подходов при проектировании подобных турбин. Это связано с тем, что неизбежные в этом случае отклонения различных эксплуатационных параметров от номинальных условий негативно отражаются на таких показателях, как эффективность и мощность.

Одним из наиболее распространенных способов регулирования является дросселирование РТ на входе в турбину, несмотря на то, что это приводит к увеличению потерь кинетической энергии потока РТ из-за нерасчетных условий работы сопел СА и лопаток РК при смене режима работы.

Необходимая мощность МРТ достигается увеличением давления РТ перед ней, что приводит к уменьшению удельных объемных расходов газа (пара) через проточную часть, что приводит к необходимости парциального подвода РТ к РК, из-за чего происходит снижение эффективности турбины.

Для решения этой проблемы проф. И. И. Кирилловым (СПбГПУ) было предложено уменьшить угол выхода сопел СА (до значений, минимально допустимых с технологической точки зрения) с целью увеличения высоты лопаток с сохранением мак-

симально возможной дуги подвода РТ к РК. При этом РК выполняется с большими относительным шагом и углом поворота лопаток. Все это должно привести к тому, что уменьшение потерь кинетической энергии, связанных с парциальностью окажется значительнее потерь, связанных с ухудшением газодинамических характеристик проточной части МРТ. Особенности таких турбин является полный подвод РТ к РК за счет уменьшения угла выхода сопел СА до 5° [1–8] и применение РК с большим относительным шагом лопаток [9], что позволяет устранить потери кинетической энергии, связанные с парциальным подводом. Исследования эффективности вышеуказанных турбин проводились экспериментально из-за сложности процессов, протекающих в соплах и каналах РК [10–14]. Также предпринимаются попытки создания математической модели течения газа в соплах на основе дифференциальных уравнений газовой динамики [15].

Основное влияние на эффективность турбин оказывает совершенство проточной части СА. В этом направлении были проведены работы [16–26], которые показали перспективность исследований в данном направлении. Учет результатов работ по совершенствованию характеристик РК, приведенных в [9, 27, 28], позволит оптимально проектировать профиль лопаток СА и РК при условии того, что давление в области между ними известно. Для этого выполнены работы [29–32]. В результате появилась возможность оценивать давление в области между СА и РК в зависимости от режимных и конструктивных факторов МРТ. Кроме этого, в работах [33, 34] приведены результаты анализа влияния различных факторов, влияющих непосредственно на КПД турбин.

Для обеспечения необходимой частоты вращения РК допустимо применение подшипников, конструирование и расчет которых возможен по методикам, изложенным в работах [35–37]. Предполагается привлечь к исследованиям МРТ акустические методы, успешно применяемые в других областях науки [38, 39]. При необходимости исследований проточной части МРТ с другими параметрами РТ или размерами необходим учет рекомендаций [40, 41].

Используя совместно результаты работ, указанных выше, с работами в области много-

режимной оптимизации МРТ [42, 43], можно профилировать высокоэффективные МРТ, работающие на нескольких режимах при дроссельном регулировании параметров РТ на входе в СА.

Работа выполнена по госзаданию Министерства науки и образования РФ, НИР № 543 и при поддержке Научного фонда ДВФУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kortikov N. N., Ben'ko A. V. The aerodynamic design of separationless supersonic curved nozzles: the physical model and numerical experiment // International symposium heat transfer enhancement in power machinery. – М., 1995. – Р. 142–145.
2. Benko A. W. Mathematical design and multiregim optimization of low-expense turbine for submarine apparatus driving // XVIII International Symposium on Ship Power Plants. – Gdynia, 1996.
3. Бенько А. В. Математическое моделирование и оптимизация малорасходных турбин с большим относительным шагом с целью повышения эффективности на переменных режимах : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб, 1995. – Р. 65–68.
4. Фершалов Ю. Я. Совершенствование сверхзвуковых осевых малорасходных турбин : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Владивосток, 2000. – 153 с.
5. Фершалов Ю. Я. Один из путей совершенствования энергетических характеристик осевых малорасходных турбин // Актуальные проблемы создания и эксплуатации тепловых двигателей в условиях Дальневосточного региона России : материалы Междунар. науч.-техн. конф. «Двигатели 2013», Хабаровск, 16–20 сентября 2013 г. / под ред. В. А. Лашко. – Хабаровск, 2013. – С.108–112.
6. Фершалов А. Ю., Фершалов Ю. Я., Фершалов М. Ю. Состояние вопроса и определение цели исследования сверхзвуковых осевых малорасходных турбин // Вологодские чтения. – 2007. – № 65. – С.100–102.
7. Фершалов Ю. Я., Фершалов А. Ю., Акуленко В. М., Фершалов М. Ю., Цыганкова Л. П. Перспективность исследований и области применения малорас-

- ходных турбин // Вологдинские чтения. – 2010. – № 78. – С. 159–164.
8. Фершалов Ю. Я., Соловьев С. П., Коршунов В. Н., Цыганкова Л. П. Эффективность малорасходной турбины с малыми конструктивными углами выхода сопел соплового аппарата // Морские интеллектуальные технологии. – 2013. – № 2 (спецвыпуск). – С. 80–83.
 9. Фершалов А. Ю. Повышение эффективности рабочих колес судовых осевых малорасходных турбин : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Дальневосточный государственный технический университет. – Владивосток, 2011. – 125 с.
 10. Фершалов Ю. Я. Разработка моделей малорасходных турбинных ступеней и стенда для исследования сопловых аппаратов // Судостроение. – 2004. – № 6. – С. 42–46.
 11. Фершалов Ю. Я. Совершенствование сверхзвуковых осевых малорасходных турбин : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Владивосток, 1999. – 24 с.
 12. Фершалов Ю. Я., Сазонов Т. В. Экспериментальные исследования сопел // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2013. – № 14. – С. 34–38.
 13. 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.
 14. Рассохин В. А., Раков Г. Л., Никитенко Е. Л., Бенько А. В. Экспериментальный стенд для исследования потока в межлопаточных вращающихся каналах рабочих колес малорасходных турбин при высоких степенях расширения // Информ. листок ЛенЦНТИ. – Л., 1992. – № 181–92.
 15. Фершалов М. Ю., Фершалов Ю. Я. Модель течения вязкого газа в сверхзвуковых соплах турбин // Вологдинские чтения. – 2007. – № 65. – С. 102–103.
 16. Фершалов Ю. Я., Фершалов А. Ю., Симашов Р. Р. Газодинамические характеристики сопловых аппаратов с малыми углами выхода потока в составе осевой малорасходной турбины // Судостроение. – 2009. – № 6. – С. 56–59.
 17. Фершалов Ю. Я., Чехранов С. В. Статические испытания сопловых аппаратов с малым углом выхода потока // Судостроение. – 2005. – № 5. – С. 54–56.
 18. 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.
 19. Фершалов Ю. Я. Степень расширения сопел с малым углом выхода, предназначенных для сопловых аппаратов осевых малорасходных турбин // Автомобильная промышленность. – 2013. – № 3. – С. 16–19.
 20. Фершалов Ю. Я., Луценко В. Т. Определение степени расширения сопел с малым углом выхода для сопловых аппаратов малорасходных турбин // Судостроение. – 2012. – № 4. – С. 50–51.
 21. Фершалов Ю. Я., Акуленко В. М. Угол выхода рабочего тела из сопловых аппаратов осевых малорасходных турбин с соплами новой конструкции // Научное обозрение. – 2011. – № 4. – С. 91–96.
 22. Фершалов Ю. Я., Акуленко В. М. Коэффициент скорости сопловых аппаратов осевых малорасходных турбин с соплами новой конструкции // Научное обозрение. – 2011. – № 5. – С. 362–368.
 23. Фершалов Ю. Я., Алексеев Г. В. Влияние степени расширения сопел с малым углом выхода на эффективность малорасходных турбин // Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2013. – № 8(197). – С. 18–22.
 24. Пат. RUS 2232902 05.07.2002. Сопловой аппарат осевой турбины / Ю. Я. Фершалов, В. А. Рассохин.
 25. Фершалов Ю. Я., Фершалов А. Ю. Сопловой аппарат осевой малорасходной турбины // Судостроение. – 2010. – № 3. – С. 46–47.
 26. Фершалов Ю. Я., Цыганкова Л. П., Акуленко В. М. Использование поверхности зависимых сечений при профилировании сопел осевой турбины // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2010. – Т. 3. – № 5. – С. 35–41.
 27. Фершалов А. Ю., Грибиниченко М. В., Фершалов Ю. Я. Газодинамические характеристики рабочих колес осевых турбин с большим углом поворота проточной части //

- Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2012. – № 1. – С. 88–98. – (Машиностроение).
28. Фершалов А. Ю., Грибиниченко М. В., Фершалов Ю. Я. Эффективность рабочих колес малорасходных турбин с большим углом поворота потока // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2011. – № 117. – С. 52–55.
29. 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.
30. Влияние конструктивных факторов на степень реактивности малорасходных турбинных ступеней / Г. В. Алексеев, М. Ю. Фершалов, Ю. Я. Фершалов, В. Т. Луценко, Ю. В. Якубовский, Б. Я. Карастелев, Е. И. Кончаков // Научное обозрение. – 2012. – № 2. – С. 346–357.
31. Фершалов М. Ю., Фершалов Ю. Я., Алексеев Г. В. Степень реактивности малорасходной турбины с малыми конструктивными углами выхода сопел соплового аппарата // Научное обозрение. – 2013. – № 1. – С. 149–153.
32. Фершалов М. Ю., Фершалов Ю. Я., Соловьев С. П. Совершенствование методов расчета степени реактивности осевых малорасходных турбин с малыми углами выхода сопловых аппаратов // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2013. – № 3(16). – С. 39–43.
33. Влияние режимных факторов на КПД малорасходных турбинных ступеней / Ю. Я. Фершалов, И. Н. Ханькович, А. Н. Минаев, Б. Я. Карастелев, Ю. В. Якубовский, Е. И. Кончаков // Научное обозрение. – 2012. – № 5. – С. 425–439.
34. Влияние конструктивных факторов на КПД малорасходных турбинных ступеней / Ю. Я. Фершалов, И. Н. Ханькович, А. Н. Минаев, Б. Я. Карастелев, Ю. В. Якубовский, Е. И. Кончаков // Научное обозрение. – 2012. – № 5. – С. 440–450.
35. Куренский А. В., Грибиниченко М. В., Фершалов Ю. Я. Результаты численного эксперимента осевых гибридных лепестковых подшипников с газовой смазкой // Научное обозрение. – 2011. – № 5. – С. 303–311.
36. 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. – Т. спецвыпуск. – № 1. – С. 21–23.
37. Грибиниченко М. В., Куренский А. В., Самсонов А. А., Фершалов Ю. Я. Численный эксперимент при исследовании свойств смазочного слоя осевых подшипников с газовой смазкой // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2011. – № 12. – С. 18–20.
38. Коренбаум В. И., Рассказова М. А., Почекутова И. А., Фершалов Ю. Я. Механизмы шумообразования свистящих звуков, наблюдаемых при форсированном выдохе здорового человека // Акустический журнал. – 2009. – Т. 55. – № 4-5. – С. 516–525.
39. Korenbaum V. I., Rasskazova M. A., Pohekutova I. A., Fershalov Y. Y. Mechanisms of sibilant noise formation observed during forced exhalation of a healthy person // Acoustical Physics. – 2009. – Т. 55. – № 4-5. – P. 528–537.
40. Фершалов Ю. Я. Методика физического моделирования газодинамических процессов в проточной части турбомашин // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2012. – № 4. – С. 71–74.
41. Fershalov Y. Y. Technique for physical simulation of gasodynamic processes in the turbomachine flow passages // Russian Aeronautics. – 2012. – Т. 55. – № 4. – P. 424–429.
42. Бусурин В. Н., Рассохин В. А., Садовничий В. Н., Бенько А. В. Моделирование и многорежимная оптимизация малорасходных турбин // Тез. докл. юбилейной науч.-техн. конф. «Инновационные наукоемкие технологии для России». – СПб, 1995. – С. 39.
43. Бусурин В. Н., Рассохин В. А., Бенько А. В. Моделирование переменных режимов работы малорасходных турбин с большим относительным шагом // Тез. докл. юбилейной науч.-техн. конф. «Инновационные наукоемкие технологии для России». – СПб., 1995. – С. 47.

Соломахин Юрий Васильевич, канд. техн. наук, доцент кафедры «Сервис транспортных средств», ФГБОУ ВПО «Владивостокский государственный университет экономики и сервиса»: Россия, 690014, г. Владивосток, ул. Гоголя, 41.

Бенько Александр Васильевич, канд. техн. наук, руководитель филиала, ООО «Аривист-Консалт»: Россия, 690091 г. Владивосток, Океанский просп., 17, оф. 1312.

Китаев Максим Владимирович, магистр техники и технологий, ст. преподаватель кафедры «Кораблестроение и океанотехника», Инженерная школа ФГАОУ ВПО «Дальневосточный федеральный университет»: Россия, 690990, г. Владивосток, ул. Пушкинская, 10.

Тел.: (423) 240-40-08

E-mail: y.solomahin@mail.ru

EFFICIENCY OF AXIAL LOW-CONSUMPTION TURBINES AND THEIR ELEMENTS UNDER THROTTLE CONTROL

Solomakhin Yuriy Vasilyevich, Cand. of Tech. Sci., Ass. Prof. of "Service of vehicles" department, Vladivostok State university of economics and service. Russia.

Benko Aleksandr Vasilyevich, Cand. of Tech. Sci., head of branch, "Arivist-Consult" Ltd. Russia.

Kitaev Maksim Vladimirovich, MSc in engineering and technology, senior lecturer of "Ship-building and ocean technology" department, Engineering school of Far Eastern federal university. Russia.

Keywords: low-consumption turbine, nozzles, blade wheel, blade body, efficiency, level of reactivity.

The work examines the way of solving the problem of increasing the efficiency of low-consumption turbines with a large relative pitch of blades.