

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА В ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАЛОРАСХОДНЫХ ТУРБИН

*А. В. БЕНЬКО, Ю. В. СОЛОМАХИН**

*Владивостокский филиал таможенного представителя ООО «Аривист-Консалт»,
*ФГБОУ ВПО «Владивостокский государственный университет экономики и сервиса»,
г. Владивосток*

Аннотация. Рассмотрена возможность повышения эффективности малорасходных турбин с большим относительным шагом лопаток на основе экспериментальных исследований и математического моделирования.

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

Малорасходные турбинные ступени (МРТ) широко используются в составе энергетических установок, эксплуатируемых в автономных устройствах, таких как подводные и летательные аппараты. Требования надежности, простоты и технологичности конструкции, массогабаритные и прочностные ограничения, малые объемные расходы рабочего тела (РТ) при высоких начальных газодинамических параметрах обусловили применение в основном парциальных активных одновенечных и двухвенечных сверхзвуковых МРТ. Актуальность работы в этом направлении обусловлена тем, что практически во всех областях обеспечение высокой экономичности в широком диапазоне режимов работы является обязательным требованием.

Трудности проектирования оптимальной проточной части подобных турбин связаны как с условиями эксплуатации, которые сопровождаются малыми величинами объемного расхода РТ, широким диапазоном изменения срабатываемого перепада давлений и частоты вращения ротора турбины, так и с характерными конструктивными особенностями: значительным снижением относительных высот сопловых и рабочих лопаток; сверхзвуковыми скоростями потока в проточной части МРТ, а также с изменением величин и направления утечек РТ. В совокупности все это приводит к существенному снижению эффективности МРТ, особенно на переменных режимах работы.

Сравнительно низкая эффективность МРТ и в конечном итоге всей энергетической установки на переменном режиме определяется используемым способом проектирования, при котором турбина рассчитывается на номинальный режим и достижение максимально возможного КПД для него является приоритетной задачей. При таком подходе эффективность работы на переменном режиме, хотя и учитывается при выборе окончательного варианта проточной части МРТ, но приобретает второстепенное значение.

В ряде случаев, определяемых конкретными условиями работы, целесообразно применение МРТ, конструкция которых была предложена в ЛПИ проф. И. И. Кирилловым. Характерными особенностями таких турбин является полный подвод РТ к рабочему колесу (РК) за счет уменьшения угла выхода сопел сопловых аппаратов (СА) до 5° [1; 2, р. 142–145; 3, р. 65–68; 4; 5, с. 108–112; 6, с. 100–102; 7, с. 159–164; 8, с. 80–83] и применение РК с большим относительным шагом лопаток [9], что позволяет устранить потери кинетической энергии потока РТ из-за парциального подвода.

Для получения возможности профилирования эффективных МРТ такого типа были проведены работы, включающие в себя совершенствование ступеней при больших степенях расширения РТ на основе экспериментальных исследований с последующим анализом

результатов [10, с. 42–46; 11; 12, с. 425–439; 13, с. 440–450]. Кроме этого, были проведены исследования по изучению влияния на потери кинетической энергии СА и РК рассматриваемого типа, различных факторов [14, с. 56–59; 15, с. 54–56; 16, с. 39–41; 17, с. 88–98; 18, с. 52–55; 19, с. 16; 20, с. 50–51; 21, с. 91–96; 22, с. 362–368; 23, с. 18–22; 24, с. 34–38].

Перед проведением исследований были учтены такие особенности МРТ, как малые размеры проточных частей СА и РК не позволяют проводить измерения локальных характеристик потока, а турбулентный характер течения привносит в поток пульсации случайного характера. Кроме того, скачки уплотнений, отраженные от кромок лопаток РК, очень усложняют исследования картины течения газа. На основании вышесказанного была определена методология проведения исследований, основанная на экспериментальных исследованиях.

Особое внимание было уделено исследованиям газодинамических характеристик потока в области между СА и РК, основанным на изучении характера изменения степени реактивности модельных МРТ [25, с. 322–331; 26, с. 332–345; 27, с. 346–357; 28, с. 149–153; 29, с. 39–43].

На основании проведенных исследований были разработаны методы проектирования и конструкции элементов проточной части МРТ с целью повышения их эффективности [30, с. 21–23; 31, с. 46–47; 32, с. 35–41].

Исследования показали перспективность МРТ такого типа при условии обеспечения относительно высокой частоты вращения ротора. Проведенные в этом направлении изыскания показали возможность надежной работы МРТ на высоких частотах вращения ротора при использовании подшипников на газовой смазке [33, с. 21–23; 34, с. 18–20; 35, с. 303–311].

В дальнейшем планируется продолжить работу в данном направлении с целью повышения эффективности МРТ с большим относительным шагом лопаток на номинальном и переменном режимах в широком интервале варьирования геометрических и режимных параметров на основе теоретических [36] и экспериментальных исследований с применением акустических методов, используемых в медицине [37, с. 516–525], и опираясь на разработанные методы моделирования переменных

режимов и многорежимной оптимизации МРТ [38, с. 39; 39, с. 47].

Одна из возможностей уточнения физической картины течения газа в каналах РК приведена в работе [40].

При необходимости переноса результатов исследований на другие размеры проточной части МРТ, работающих при других условиях, можно воспользоваться результатами работ [41, с. 71–74; 42, с. 424–429].

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

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. 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. – Moscow, 1995.
3. Benko A. W. Mathematical design and multiregim optimization of low-expense turbine for submarine apparatus driving // XVIII International Symposium on Ship Power Plants. – 1996, Gdynia.
4. Фершалов Ю. Я. Совершенствование сверхзвуковых осевых малорасходных турбин : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Владивосток, 2000.
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.
6. Фершалов А. Ю., Фершалов Ю. Я., Фершалов М. Ю. Состояние вопроса и определение цели исследования сверхзвуковых осевых малорасходных турбин // Вологодские чтения. – 2007. – № 65.

7. Перспективность исследований и области применения малорасходных турбин / Ю. Я. Фершалов, А. Ю. Фершалов, В. М. Акуленко [и др.] // Вологодские чтения. – 2010. – № 78.
8. Эффективность малорасходной турбины с малыми конструктивными углами выхода сопел соплового аппарата / Ю. Я. Фершалов, С. П. Соловьев, В. Н. Коршунов [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. – 2013. – № 2 (спецвыпуск).
9. Фершалов А. Ю. Повышение эффективности рабочих колес судовых осевых малорасходных турбин : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Дальневосточный государственный технический университет. – Владивосток, 2011.
10. Фершалов Ю. Я. Разработка моделей малорасходных турбинных ступеней и стенда для исследования сопловых аппаратов // Судостроение. – 2004. – № 6.
11. Фершалов Ю. Я. Совершенствование сверхзвуковых осевых малорасходных турбин : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Владивосток, 1999.
12. Влияние режимных факторов на КПД малорасходных турбинных ступеней / Ю. Я. Фершалов, И. Н. Ханькович, А. Н. Минаев [и др.] // Научное обозрение. – 2012. – № 5.
13. Влияние конструктивных факторов на КПД малорасходных турбинных ступеней / Ю. Я. Фершалов, И. Н. Ханькович, А. Н. Минаев [и др.] // Научное обозрение. – 2012. – № 5.
14. 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.
15. Фершалов Ю. Я., Чехранов С. В. Стагические испытания сопловых аппаратов с малым углом выхода потока // Судостроение. – 2005. – № 5.
16. 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.
17. Фершалов А. Ю., Грибиниченко М. В., Фершалов Ю. Я. Газодинамические характеристики рабочих колес осевых турбин с большим углом поворота проточной части // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. – 2012. – № 1. – (Машиностроение).
18. 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.
19. Фершалов Ю. Я. Степень расширения сопел с малым углом выхода, предназначенных для сопловых аппаратов осевых малорасходных турбин // Автомобильная промышленность. – 2013. – № 3.
20. Фершалов Ю. Я., Луценко В. Т. Определение степени расширения сопел с малым углом выхода для сопловых аппаратов малорасходных турбин // Судостроение. – 2012. – № 4.
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.
22. Фершалов Ю. Я., Акуленко В. М. Коэффициент скорости сопловых аппаратов осевых малорасходных турбин с соплами новой конструкции // Научное обозрение. – 2011. – № 5.
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).
24. Фершалов Ю. Я., Сазонов Т. В. Экспериментальные исследования сопел // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2013. – № 14.
25. Обоснование и выбор метода исследования степени реактивности малорасходных турбин / Г. В. Алексеев, М. Ю. Фершалов, Ю. Я. Фершалов [и др.] // Научное обозрение. – 2012. – № 2.
26. Влияние режимных факторов на степень реактивности малорасходных турбинных ступеней / Г. В. Алексеев, М. Ю. Фершалов, Ю. Я. Фершалов // Научное обозрение. – 2012. – № 2.
27. Влияние конструктивных факторов на степень реактивности малорасходных турбинных ступеней / Г. В. Алексеев,

- М. Ю. Фершалов, Ю. Я. Фершалов [и др.] // Научное обозрение. – 2012. – № 2.
28. 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.
29. 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).
30. Пат. RUS 2232902 05.07.2002. Сопловой аппарат осевой турбины / Ю. Я. Фершалов, В. А. Рассохин.
31. Фершалов Ю. Я., Фершалов А. Ю. Сопловой аппарат осевой малорасходной турбины // Судостроение. – 2010. – № 3.
32. 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.
33. 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. – Спецвыпуск. № 1.
34. Численный эксперимент при исследовании свойств смазочного слоя осевых подшипников с газовой смазкой / М. В. Грибиниченко, А. В. Куренский, А. А. Самсонов // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2011. – № 12.
35. Куренский А. В., Грибиниченко М. В., Фершалов Ю. Я. Результаты численного эксперимента осевых гибридных лепестковых подшипников с газовой смазкой // Научное обозрение. – 2011. – № 5.
36. Фершалов М. Ю., Фершалов Ю. Я. Модель течения вязкого газа в сверхзвуковых соплах турбин // Вологдинские чтения. – 2007. – № 65.
37. Механизмы шумообразования свистящих звуков, наблюдаемых при форсированном выдохе здорового человека / В. И. Коренбаум, М. А. Рассказова, И. А. Почекутова [и др.] // Акустический журнал. – 2009. – Т. 55. – № 4-5.
38. Моделирование и многорежимная оптимизация малорасходных турбин / В. Н. Бусурин, В. А. Рассохин, В. Н. Садовничий [и др.] // Тез. докл. юбилейной науч.-техн. конф. «Инновационные наукоемкие технологии для России». – СПб., 1995.
39. 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.
40. Экспериментальный стенд для исследования потока в межлопаточных вращающихся каналах рабочих колес малорасходных турбин при высоких степенях расширения / В. А. Рассохин, Г. Л. Раков, Е. Л. Никитенко [и др.] // Информ. листок ЛенЦНТИ. – Л., 1992. – № 181-92.
41. Фершалов Ю. Я. Методика физического моделирования газодинамических процессов в проточной части турбомашин // Известия высших учебных заведений. – 2012. – № 4. – (Авиационная техника).
42. Fershalov Y. Y. Technique for physical simulation of gasodynamic processes in the turbomachine flow passages // Russian Aeronautics. – 2012. – Т. 55. – № 4.

Бенько Александр Васильевич, канд. техн. наук, руководитель, Владивостокский филиал таможенного представителя ООО «Аривист-Консалт»: Россия, 690091, г. Владивосток, ул. 1-я Морская, 9.

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.

Тел.: (914) 441-64-90

E-mail: turbina_lpi@mail.ru

**CONDITION OF THE PROBLEM OF THE SPHERE OF MATHEMATICAL MODELING METHODS
APPLICATION IN DETERMINING THE EFFICIENCY OF LOW-CONSUMPTION TURBINES**

*Benko Aleksandr Vasilyevich, Cand. of Tech. Sci.,
director, Vladivostok branch of "Arivist-Consult" Ltd.
customs representative. Russia.*

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

Keywords: *low-consumption turbine, nozzles,
blade wheel, actuating medium, efficiency.*

*The work examines the possibility of increasing the
efficiency of low-consumption turbines with a large blades
pitch ratio on the basis of experimental studies and mathe-
matical modeling.*
