

Судовые энергетические установки

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2021-1-8>
УДК 621.438.1

Д.И. Ибрагимов, И.В. Мороз, Н.Т. Приходько

ИБРАГИМОВ ДАМИР ИРЕКОВИЧ – к.т.н., доцент Военного учебного центра, (автор, ответственный за переписку), SPIN: 5065-9675, ORCID: 0000-0002-8076-6051, damir-vl@mail.ru
МОРОЗ ИГОРЬ ВИКТОРОВИЧ – студент, ORCID: 0000-0002-0481-2458, izm0r0s@mail.ru
ПРИХОДЬКО НИКИТА ТИМУРОВИЧ – студент, ORCID: 0000-0001-9905-0187, nikita65612nik@mail.ru
Политехнический институт
Дальневосточный федеральный университет
Владивосток, Россия

Выбор метода исследования КПД осевых парциальных микротурбин

Аннотация: Исследования эксплуатационных характеристик осевых парциальных микротурбин необходимы для увеличения их КПД. В данной работе рассмотрены теоретический и эмпирический методы такого исследования с точки зрения возможности совершенствования их газодинамических параметров. Предпринятый авторами анализ позволил установить недостатки теоретического метода (подразделяется на аналитический и численный), а именно: неприемлемо низкая точность результатов, невозможность применения для расчёта характеристик газа при его движении в каналах микротурбины (аналитический метод) и обязательное экспериментальное подтверждение и прямая зависимость от оператора (численный метод). Тогда как эмпирический метод обеспечивает высокую достоверность исходных данных при проектировании. Следовательно, можно утверждать: эмпирический метод на сегодняшний день – наиболее перспективный для исследования эксплуатационных характеристик осевых парциальных микротурбин.

Ключевые слова: микротурбина, эффективность, сопло, турбинная ступень, теоретический метод, аналитический метод, численный метод, эмпирический метод

Введение

На протяжении продолжительного времени осевые парциальные микротурбины широко используются в качестве приводов для вспомогательных турбоагрегатов. Важнейшие для осевых парциальных микротурбин массогабаритные характеристики и экономичность оказывают значительное влияние на общую эффективность установок и агрегатов, в состав которых они входят. На практике и при теоретических разработках проектирование осевых парциальных микротурбин напрямую связано с использованием одного из представленных нами методов: Ю.И. Матюшкин, Н.А. Петров и др. [1, 3–10]. Под руководством М.Я. Иванова численный метод применялся при исследовании течения газа в проточных частях турбин [1].

При проектировании осевой парциальной микротурбины выбор неверного метода может привести к неудовлетворительным результатам, затрудняя, а порой делая невозможным построение регрессионных математических моделей и разработку достоверных рекомендаций для увеличения КПД микротурбины.

Цель данной работы – определение наиболее рационального метода для исследования эффективности осевых парциальных газовых микротурбин.

© Ибрагимов Д.И., Мороз И.В., Приходько Н.Т., 2021

Статья: поступила: 23.10.2020; рецензии: 29.10.2020 и 30.10.2020; принята: 29.01.2021; финансирование: Дальневосточный федеральный университет.

Теоретический метод

Подразделяется на аналитический и численный. Рассмотрим их.

Аналитический метод. Заключается в решении уравнения Навье–Стокса путем создания математических моделей и последующем их анализе [1, 2].

На данный момент расчёт движения газа в каналах микротурбины данным методом с достаточной точностью невозможен. Основные причины – определенные допущения в выводимых уравнениях, сложность процессов в проточных частях. К этим причинам относятся следующие.

- *Турбулентность течения*, зависящая от высоких скоростей потока в соплах микротурбины. Выходящий из сопел поток пересекается с кромками лопаток вращающегося рабочего колеса, что приводит к значительному усложнению расчета.

- *Вихри, возникающие при турбулентном течении*, – имеют случайный характер. Соответственно, ударные волны, которые возникают при обтекании кромок лопаток, также имеют случайный характер.

- *Ударные волны* сразу же после выхода из проточных частей сопел значительно влияют на газодинамические характеристики потока рабочего тела. Причина – малый угол установки сопел.

- *Малые размеры проточных частей микротурбины*, из-за которых на данный момент невозможно разместить датчики регистрации локальных характеристик потока так, чтобы погрешность измерения имела допустимые значения.

Названные причины значительно увеличивают погрешность результатов, полученных как расчетным методом, так и в ходе проведенного эксперимента.

В работе [3] приведены уравнения для расчета эффективности промежуточной ступени, составленные совместным преобразованием уравнений расхода, количества и энергии движения. В качестве допущений авторы [3] принимали следующий ряд условий:

- 1) показатели скорости рабочего колеса постоянны и не зависят от параметров выбранного режима;

- 2) при определении утечки не учитывается радиальная неравномерность в осевом зазоре.

В результате точность совпадения расчетных и экспериментальных данных для принятых режимов оказывается зависима от выбранных инженером-конструктором показателя скорости и утечки потока рабочего тела.

Численный метод. Представляет собой решение уравнений сохранения, состояния и движения рабочего тела в численном виде.

Для оценки эффективности сопловых аппаратов используются такие программы, как FLUENT, STAR-CD, NUMECA и др. Коммерческие программы дают возможность проанализировать течение рабочего тела и рассчитать интегральные характеристики решеток в достаточно широком диапазоне режимов обтекания. Однако для решения конкретных задач они не универсальны. На конечные результаты влияют следующие параметры:

- 1) число ячеек,
- 2) точность дискретизации,
- 3) тип расчётной сетки,
- 4) степени турбулентности,
- 5) модели турбулентности.

При расчёте осевых парциальных микротурбин выделен ряд особенностей, которые ограничивают использование данного метода на практике. К ним относятся следующие.

- *Расчёт* занимает большое количество времени даже на мощных компьютерах.

- *Погрешность расчётов.* Расчёт не гарантирует применение единственной полученной модели ко всем возможным частным случаям. Например, моделей турбулентности насчитывается более десяти. Исходя из этого делаем вывод: на данный момент невозможно построить модель турбулентности, на которой можно выполнить расчеты с учетом всех рабочих условий.

- *Низкая достоверность расчетов.* Иногда приводит к использованию схем вычисления, которые не могут обеспечить наилучший результат.
- *Сложность идентификации* связана с тем, что программные пакеты математического обеспечения расчетов течения газа представляют несколько схем вычисления и моделей турбулентности, что, с одной стороны, является следствием универсальности таких пакетов, с другой – они обычно не проходят достаточной верификации по экспериментальным данным из-за отсутствия таковых у фирм-разработчиков.

Анализ течения газа в проточных частях осевых парциальных микротурбин можно выполнить в одномерной, двумерной и трехмерной постановке, которые предполагают получение значений эффективности по интегральным характеристикам. Дальнейшее нахождение КПД основано на рассчитанных характеристиках потока рабочего тела в любой плоскости узлов сетки в виде суммы векторов и на вычислении эффективности потока рабочего тела по всей длине проточной части узлов сетки в виде векторов. Например, в Центральном институте авиационного моторостроения имени П.И. Баранова [1, 4] существуют методики расчёта двумерного и трёхмерного течения газа в проточных частях турбин. На основе этого исследования разработана технология для проектирования турбин, позволившая уменьшить затраты на их создание в 3–5 раз.

В рамках численного метода существуют рекомендации по разработке расчётной модели, но для исследования эффективности осевых микротурбин они не всегда применимы. В частности, при значительных углах поворота профиля сопел применение периодичных граничных условий вызывает появление сильно скошенных конечных элементов вблизи выходной кромки, отрицательно влияющих на результаты расчета. Следовательно, разработка окончательной инженерной методики возможна только совмещением анализа результатов расчета и экспериментальных исследований.

В литературе (см., например, [5]) представлен расчет течения рабочего тела в проточных частях турбин. В расчетную область включается вся проточная часть, так как исходная система уравнений относится к эллиптическому типу. Эта особенность позволяет учесть взаимное влияние венцов вверх и вниз по потоку в рамках осесимметричного приближения. Реализация описанной задачи на практике имеет ряд проблем.

1. Не учитывается смещение потока, что, в свою очередь, влечет за собой большую погрешность расчета, в частности на долевых режимах и при непостоянных потерях.
2. Значительно малая вероятность получения решения поставленной задачи для околозвуковых ступеней с заданными параметрами на выходе и суммарным расходом, так как при определении перепада энтальпий необходима максимально высокая точность: малейшая ошибка может привести к существенной погрешности расчетов.
3. Вращающееся рабочее колесо в расчетной части ухудшает сходимость решения задачи из-за нелинейных членов в уравнениях исходной системы.
4. Недостаточное уплотнение радиальных зазоров, приводящее к значительным расходам экспериментальных и расчетных данных [9].

Расчет потока рабочего тела в проточных частях осевых парциальных микротурбин сводится к решению уравнения Навье–Стокса при учете вращения рабочего колеса. Однако на сегодняшний день сделать это аналитическим методом невозможно, в особенности если рассчитывается сверхзвуковая микротурбина, поскольку к имеющейся турбулентности добавляется неравномерность потока по причине вращения рабочего колеса.

Исследователи сверхзвуковых осевых парциальных микротурбин для получения уравнений при помощи метода последовательных приближений берут во внимание (при неустойчивых режимах работы) лишь влияние степени реактивности и не основываются на экспериментах. При этом они не принимают в расчет массу протечки и ее влияние на скачкообразность давления по высоте лопатки, однако при численном моделировании влияние на степень реактивности учитывается. Для определения эффективности турбинной ступени, а также для достаточно большой точности расчета нужно использовать эмпирические зависимости. Кроме того, необходимо

учитывать, насколько отклоняется поток в косых срезах сопел на режимах, которые отличаются от расчетного [6].

Конечный результат зачастую не достигается, так как при введении полученных данных в ходе эксперимента в расчете при помощи метода последовательных приближений наблюдается изменение функции. Она перестает быть непрерывной, а это негативно сказывается на сходимости процесса.

Эмпирический метод

Метод основан на систематизации и обобщении данных, которые были получены в ходе эксперимента на физических моделях. Затем необходимо получить ряд математических зависимостей, обобщающих результаты экспериментов. Завершается метод общим анализом полученных результатов путем имитационного моделирования.

Применение данного метода может обеспечить высокую достоверность исходных данных для проектирования осевых парциальных микротурбин, поэтому подобные исследования на специальных стендах приобретают все большее распространение [7].

Значительная погрешность обнаруживается при сравнении результатов теоретических исследований микротурбин с полученными результатами и эксперимента в двумерной и трехмерной постановке. Это обусловлено малыми размерами проточных частей, а также вращением рабочего колеса [9]. Учитывая данные условия, можно сделать вывод, что результаты, полученные теоретическим методом, не удастся подтвердить экспериментально – на моделях. Поэтому такие исследования необходимо выполнять только в одномерной постановке, что позволит учесть особенности работы осевых парциальных микротурбин: неравномерность параметров рабочего тела, вибрация установки, которая происходит из-за вращения рабочего колеса и др. При исключении всех недочетов и выполнении всех условий результаты будут иметь значительно меньшую погрешность [8].

Заключение

В результате проведенного анализа теоретического и эмпирического методов мы, определив их недостатки и преимущества, пришли к убеждению, что результаты теоретического исследования не имеют научной и практической значимости до тех пор, пока не будут подтверждены экспериментально. Главный недостаток теоретического метода – неприемлемо низкая точность результатов, невозможность применения для расчёта характеристик газа при его движении в каналах микротурбины.

В то же время эмпирический метод обеспечивает высокую достоверность исходных данных. Поэтому, если необходима экспериментальная проверка результатов, полученных аналитически или с помощью численных методов, исследования микротурбин необходимо начинать, используя эмпирический метод в его полном объеме: эксперимент, измерение, математическое моделирование, проверки результатов – погрешность, адекватность способность к предсказанию и т.п., сравнение полученных результатов с результатами других авторов с последующим анализом. И лишь затем пытаться подвести теоретическое обоснование всем тем допущениям и «идеализациям», всегда присутствующим при теоретических изысканиях.

Эмпирический метод, обеспечивающий высокую достоверность исходных данных, – наиболее рациональный и удобный для проектирования осевых парциальных микротурбин.

Вклад авторов в статью: Д.И. Ибрагимов – общее руководство, формулирование цели, задач и выводов, работа с текстом статьи, основной вклад в ее написание; И.В. Мороз – изучение степени разработанности темы, работа с текстом статьи; Н.Т. Приходько – поиск и анализ литературных источников, оформление статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов М.Я., Крупа В.Г., Нигматуллин Р.З. Неявная схема С.К. Годунова повышенной точности для интегрирования уравнений Навье–Стокса // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1989. Т. 29, № 6. С. 888–901.
2. Ибрагимов Д.И. Совершенствование эксплуатационных характеристик судовой осевой парциальной микротурбины с одиночным соплом: дис. ... канд. техн. наук / Дальневост. федерал. ун-т. Владивосток, 2019. 131 с.
3. Митюшкин Ю.И., Петров Н.А. Коэффициент полезного действия и реактивность турбинной ступени заданной геометрии // Проблемы повышения эффективности судовых энергетических установок. Горький, 1988. С. 31–38.
4. Попов Г.М., Матвеев В.Н. Разработка перспективного малоразмерного двигателя для БПЛА // Вестник Рыбинской гос. авиационной технолог. академии им. П.А. Соловьева. 2011. № 2(20). С. 55–58.
5. Фершалов Ю.Я. Моделирование, анализ и совершенствование газодинамических характеристик судовых осевых сверхзвуковых малорасходных турбинных ступеней: дис. ... д-ра техн. наук. Владивосток, 2014. 355 с.
6. Юртаев А.А., Фершалов А.Ю., Фершалов Ю.Я., Поршкевич В.В. Методика проектирования ступеней осевых микротурбин с частичной интеграцией рабочего колеса в сопловой аппарат // Морские интеллектуальные технологии. 2019. Т. 3, № 45. С. 54–58.
7. Юртаев А.А., Семенихин А.А., Ибрагимов Д.И., Юртаев А.А. Изученность методов повышения эффективности сопловых аппаратов малорасходных турбин // Морской вестник. 2017. № 3(63). С. 76–77.
8. Fershalov A.Y., Fershalov Y.Y., Fershalov M.Y., Sazonov T.V., Ibragimov D.I. Analysis and optimization of efficiency of rotor wheels microturbines. Applied Mechanics and Materials. 2014;635–637:76–79.
9. Fershalov A.Y., Fershalov Y.Y., Tsigankova L.P. The degree of influence of constructive and regime factors on the characteristics of turbine wheel steps shoulder who are more angles of rotation. Recent advances in mathematics. 2015, p. 130–133.
10. Sazonov T.V., Fershalov Y.Y., Fershalov M.Y., Fershalov A.Y., Ibragimov D.I. Experimental installation for the study of nozzles microturbines. Applied Mechanics and Materials. 2014;635–637:155–158.

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2021. N 1/46

Marine Engines and Auxiliary Machinery

www.dvfu.ru/en/vestnikis

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2021-1-8>

Ibragimov D., Moroz I., Prikhodko N.

DAMIR IBRAGIMOV, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor (Corresponding Author), SPIN: 5065-9675, ORCID: 0000-0002-8076-6051, damir-vl@mail.ru

IGOR MOROZ, Student, ORCID: 0000-0002-0481-2458; izm0r0s@mail.ru

NIKITA PRIKHODKO, Student, ORCID: 0000-0001-9905-0187, nikita65612nik@mail.ru

Polytechnical Institute,

Far Eastern Federal University

Vladivostok, Russia

Selection of a method for studying the efficiency of axial partial microturbines

Abstract: The study of operational characteristics is necessary to increase the efficiency of axial partial microturbines. In this paper, theoretical and empirical research methods are considered from the point of possibility of their practical application to improve the gas-dynamic characteristics of axial partial microturbines. The analysis made it possible to establish the advantages and disadvantages of each method. The theoretical method is subdivided into analytical and numerical, the disadvantage of the analytical method is the unacceptably low accuracy of the results, as well as the impossibility of its use for calculating the characteristics of gas

moves in the channels of the microturbine. The results of the numerical method require mandatory experimental confirmation and are directly dependent on the operator. The empirical method provides high reliability of the initial data when designing axial partial microturbines. Based on the analysis performed, it can be stated that the empirical method is currently the most promising for studying the efficiency of axial partial microturbines.

Keywords: microturbine, efficiency, reactivity, nozzle, turbine stage

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

REFERENCES

1. Ivanov M.Ya., Krupa V.G., Nigmatullin R.Z. The implicit scheme of S.K. Godunov of increased accuracy for integrating the Navier-Stokes equations. *J. of Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 1989;29(6):888–901.
2. Ibragimov D.I. Improving the performance characteristics of a ship's axial partial microturbine with a single nozzle. *Dis. Can. Technical Sciences, Far Eastern Federal University. Vladivostok*, 2019, 131 p.
3. Mityushkin Yu.I., Petrov N.A. Efficiency and reactivity of a turbine stage of a given geometry. *Problems of increasing the efficiency of ship power plants. Gorky*, 1988, p. 31–38.
4. Popov G.M., Matveev V.N. Development of a promising small-sized engine for UAVs // *Bulletin of Rybinsk State. aviation technologist. academy named after P.A. Solovyov*. 2011(20):55–58.
5. Fershalov Yu.Ya. Modeling, analysis and improvement of gas-dynamic characteristics of ship axial supersonic low-flow turbine stages, *Dis. ... D-ra Tekhn. Sciences. Vladivostok*, 2014, 355 p.
6. Yurtaev A.A., Fershalov A.Y., Fershalov Y.Y., Porshkevich V.V. The methodology of design stages axial turbines with partial integration of the impeller in the nozzle. *Marine Intelligent Technologies*. 2019;3(45):54–58.
7. Yurtaev A.A., Semenikhin A.A., Ibragimov D. I., Yurtaev A.A. Study of methods for improving the efficiency of low-flow turbine nozzle devices. *Marine Bulletin*. 2017(63):76–77.
8. Fershalov A.Y., Fershalov Y.Y., Fershalov M.Y., Sazonov T.V., Ibragimov D.I. Analysis and optimization of efficiency of rotor wheels microturbines. *Applied Mechanics and Materials*. 2014;635–637:76–79.
9. Fershalov A.Y., Fershalov Y.Y., Tsigankova L.P. The degree of influence of constructive and regime factors on the characteristics of turbine wheel steps shoulder who are more angles of rotation. *Recent advances in mathematics*. 2015, p. 130–133.
10. Sazonov T.V., Fershalov Y.Y., Fershalov M.Y., Fershalov A.Y., Ibragimov D.I. Experimental installation for the study of nozzles microturbines. *Applied Mechanics and Materials*. 2014;635–637:155–158.