

УДК 621.452.32

Д.А. Боровиков А.В. Ионов, С.Д. Селиверстов

Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), Москва, Россия

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МИКРОГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК
В НАЗЕМНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ**

Предложено использование малоразмерного газотурбинного двигателя в наземных энергетических установках беспилотных летательных аппаратах, дозвуковых мишенях противовоздушной обороны и малоразмерных средствах поражения. Основное внимание в работе уделено мобильным энергетическим установкам наземного применения. Рассмотрено назначение подобных установок для нужд специальных служб и военных, а также кратко описано текущее состояние их производства в мире. Приведены преимущества малоразмерных двигателей над реактивными двигателями традиционных размерностей с точки зрения возможных перспективных конструкторских и технологических решений, таких как использование композитных материалов в горячей части двигателя и простота внесения изменений в конструкцию отдельных узлов и деталей. Предложены варианты улучшения низких удельных характеристик малоразмерных газотурбинных двигателей, прежде всего, благодаря увеличению степени повышения давления в компрессоре и повышению температуры газа перед турбиной. Также приведено сравнение параметров: температуры газа в теплообменнике, мощности, удельного расхода топлива и КПД двигателей с различными температурами газа перед турбиной и степенями повышения давления в компрессоре, при различных модификациях конструкции и/или при использовании композитных материалов в горячей части. Была проведена верификация методики проектирования центробежных компрессоров, которая позволила повысить КПД и другие параметры устройства. Помимо этого приведены изображения и описаны использованные в ходе работы средства производства: установка стереолитографии, станок с ЧПУ, а также испытательный стенд. Большая часть исходных данных была взята при пусках двигателей прототипов на испытательном стенде.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, энергетическая установка, центробежный компрессор.

D.A. Borovikov, A.V. Ionov, S.D. Seliverstov

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

MICROTURBINE USAGE AT THE TERRESTRIAL ENERGETICS

The article suggested the use of small gas turbine engine in the ground power plants, unmanned aircrafts, subsonic air defense targets and maneuverable small size weapons. The main regard was given to the mobile ground power plants. We consider the appointment of such plants for special services and military needs, and briefly described the current state of their production in the world. Also we review the advantages of small engines on jet engines of traditional dimensions in terms of possible advanced design and technological solutions, such as the use of composite materials in the hot part of the engine and the ease of making changes in the design of individual components and parts. The variants of improving low specific characteristics of small gas turbine engines were offered, primarily due to

increasing of the compressive ratio in the compressor and increasing the gas temperature in front of the turbine. Also the following parameters were compared: temperature of the gas in a heat exchanger, power output, specific fuel consumption and engine efficiency at different temperatures of gas in front of the turbine and the compressive ratio of the compressor, at various design modifications and / or by using composite materials in the hot part. Also the verification of design techniques of centrifugal compressors was made, which has improved efficiency and other parameters of the device. In addition, the images were shown and the means of production that were used during the work were described: the stereolithography installation, CNC, as well as the test bench. Most of the raw data was taken at the engine prototypes start-ups on a test bench.

Keywords: jet engine, power plant, centrifugal compressor.

Малоразмерные ГТД (микроГТД) получают все большее применение. Такие двигатели могут применяться для всепогодных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), дозвуковых мишеней ПВО и маневренных малоразмерных средств поражения, также свое применение они находят в наземных генераторных установках. Энергетическая установка на базе микроГТД обладает рядом преимуществ, как-то: компактность, мобильность и крайне высокая удельная мощность. Требования, предъявляемые к подобным установкам, довольно высоки: они должны быть надежны, экономичны, обладать большим ресурсом, а также быть технологичными. Проектирование подобных установок наталкивается на значительные трудности, прежде всего на этапе проектирования микроГТД. Это связано в первую очередь с масштабным вырождением рабочего процесса: за уменьшением размерности установки следует непропорциональное уменьшение мощности. На факультете двигателей летательных аппаратов Московского авиационного института (НИУ) ведутся разработки микроГТД и энергетических установок на базе таких двигателей [1].

Несмотря на высокую потребность в надежных и мобильных энергетических установках такого типа, в мире не так много производителей подобных установок: Elliott, Bowmen, Capstone и т.д. Такие установки ориентированы в первую очередь на МЧС, мобильные бригады пожарных служб, военных, а также предназначены для работы в условиях Крайнего Севера, Арктики и Антарктики, для резервных источников питания на судах, во временных поселениях, на магистральных газопроводах и т.д. На российском рынке мало представлены подобные установки отечественного производства.

Основными задачами научного коллектива являются: повышение КПД и ресурса установки. Повышение КПД достигается за счет использования новых композиционных материалов и новых методик

проектирования, направленных на увеличение температуры газа перед турбиной и степени повышения давления компрессора [2]. Небольшие размеры установки позволяют использовать композитные материалы в горячей части двигателя: сопловом аппарате, турбине [3].

Другим важным параметром двигательной установки является степень повышения давления в компрессоре. На данный момент большинство центробежных компрессоров малоразмерных двигателей работают в диапазоне степени повышения давления 3–8, что достаточно далеко от экстремума термодинамического КПД [4]. Коллективом была проведена верификация методик проектирования компрессоров, в результате которой была получена методика для профилирования широкохордного центробежного компрессора высокой напорности (рис. 1) [5, 8].



Рис. 1. Сравнение рабочих колес теоретического 1 и прототипа 2

Помимо этого предлагается установить осевую ступень компрессора перед центробежной ступенью. Использование гибридного широкохордного компрессора позволяет поднять степень повышения давления до 10–14, что соответствует экстремуму термодинамического КПД для имеющихся диапазонов температур неохлаждаемых материалов турбины [6, 7].

В работе рассматривается ГТУ, рассчитанная на расход воздуха 0,7 кг/с, другие параметры получены на испытательном стенде (первая колонка) (таблица). Высоконапорный компрессор был рассчитан с помощью программного комплекса Ansys.

Сравнение термогазодинамических параметров ГТУ с различными степенями модификации

Параметр	Установка на базе двигателя без модификаций	Установка на базе двигателя с композитной горячей частью	Установка на базе двигателя с широкохордным гибридным компрессором	Установка на базе двигателя с широкохордным гибридным компрессором и композитной горячей частью
π	3,8	3,8	11	11
T , К	1050	1600	1050	1600
N , кВт	225	325	235	380
C , г/кВт	165,6	151,56	105,48	92,52
T_t , К	785	1200	620	935
η , %	21	25	32	40

Примечание. Использованные обозначения: π – степень повышения полного давления компрессора, T – температура газа перед турбиной, N – мощность, идущая на генерацию электроэнергии, C – удельный расход, T_t – температура газа, поступающего в теплообменник, η – электрический КПД.

Одним из проблемных узлов подобных установок являются подшипники. Предлагается использовать бесконтактные газодинамические подшипники, это позволяет избежать необходимости смазки и охлаждения, а также износа подшипников во время работы двигателя, что значительно увеличивает ресурс.

Параллельно с расчетными и проектировочными ведутся работы по изготовлению деталей микроГТД для собственных опытных образцов на следующих имеющихся производственных мощностях: станки для механообработки с ЧПУ, прототипирующая стереолитографическая машина, машина для вакуумного литья в силиконовые формы, лазерная прецизионная сварка, а также мобильная сканирующая система для контроля изготавливаемых деталей [9]. Отработаны технологии изготовления рабочих колес компрессора и турбины, вала, камеры сгорания, корпуса, сопла (рис. 2, 3) [10].



Рис. 2. Изготовление колеса компрессора



Рис. 3. Выжигаемая модель колеса турбины

Прорабатываются конструкторские и программные решения для стенда микроГТД. Было проведено несколько пусков двигателя-прототипа, которые дали данные для верификации методик проектирования компрессора и турбины (рис. 4, 5). При помощи программного комплекса MathCAD был проведен термогазодинамический расчет прототипа. Была проведена верификация методики проектирования центробежных компрессоров, которая позволила повысить КПД устройства.



Рис. 4. Испытательный стенд

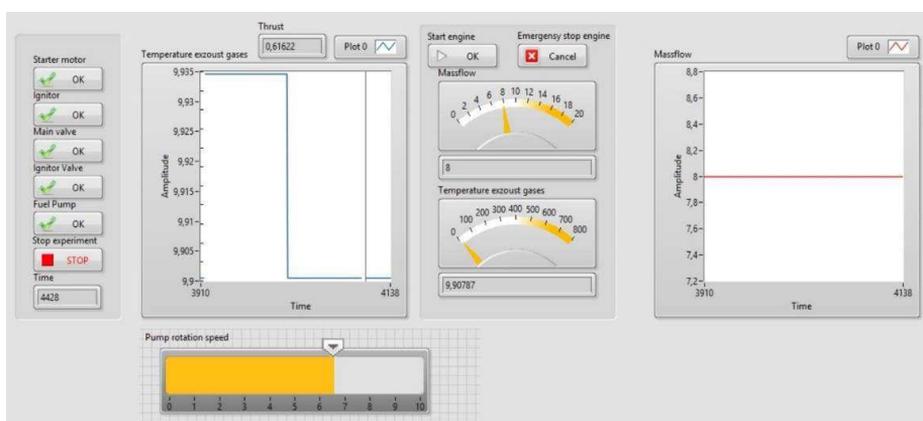


Рис. 5. Вид программы управления

Перспективным направлением развития установки является дальнейшее увеличение температуры газа до 1800 К и степени повышения давления до 20, для повышения КПД.

Использование новых методик проектирования и композитных материалов в горячей части позволит значительно повысить мощность установки и изменить соотношение теплоэнергия/электроэнергия.

Библиографический список

1. Методы математической идентификации микро-ГТД по прототипу / Д.А. Боровиков, И.А. Заранкевич, С.Ю. Новиков, А.К. Пахомов, С.Д. Селиверстов // *Авиация и космонавтика* – 2014: тез. 13-й Междунар. конф. – СПб.: Мастерская печати, 2014. – С. 277–279.

2. Разработка методик создания ВРД малых тяг / Д.А. Боровиков, С.Д. Селиверстов, А.В. Ионов, М.С. Болховитин // Будущее авиации и космонавтики за молодой Россией: материалы междунар. молодежного форума. – Рыбинск: Изд-во РГАТУ им. П.А. Соловьева, 2015. – С. 154–161.

3. Селиверстов, С.Д., Боровиков Д.А., Ионов А.В. Разработка микро-ГТД и методик их проектирования // Тезисы докл. 20-й науч.-техн. конф. молод. ученых и спец. – Королев, 2014. – С. 447–449.

4. AMT Netherlandswebsite [Электронный ресурс] // Amtjets.com. – URL: <http://www.amtjets.com/Titan.php> (дата обращения: 20.12.2014).

5. Термогазодинамические расчеты и расчет характеристик авиационных ГТД / А.Б. Агульник, В.И. Бакулев, В.А. Голубев, И.В. Кравченко, Б.А. Крылов. – М.: Изд-во МАИ, 2002. – 257 с.

6. Ржавин Ю.А., Емин О.Н., Карасев В.Н. Лопаточные машины двигателей летательных аппаратов. Теория и расчет: учеб. пособие – М.: Изд-во МАИ: Принт, 2008 – 700 с.

7. Ржавин Ю.А., Карасев В.Н. Термогазодинамический расчет турбокомпрессора для агрегата наддува ДВС: учеб. пособие. – М.: Дипак, 2004. – 45 с.

8. Чуян Р.К. Методы математического моделирования двигателей летательных аппаратов: учеб. пособие для студ. авиадвигат. спец. вузов. – М.: Машиностроение, 1988. – 288 с.

9. Болховитин М.С., Ионов А.В., Селиверстов С.Д. Развитие области применения автоматизированных производственных систем при натурном моделировании процессов и конструкций ЛА // Тезисы докл. 20-й науч.-техн. конф. молод. ученых и спец. – Королев, 2014. – С. 398–400.

10. Селиверстов С.Д., Болховитин М.С., Ионов А.В. Опыт применения автоматизированных производственных систем в научных исследованиях процессов и конструкций ЛА // Будущее авиации и космонавтики за молодой Россией: материалы междунар. молод. форума. – Рыбинск: Изд-во РГАТУ им. П.А. Соловьева, 2015. – С. 15–19.

References

1. Borovikov D.A., Zarankevich I.A., Novikov S.Iu., Pakhomov A.K., Seliverstov S.D. Metody matematicheskoi identifikatsii mikro-GTD po prototipu [Mathematical Methods of identifying micro- gas turbine engine

by the original]. *Tezisy XIII Mezhdunarodnoi konferentsii "Aviatsiia i kosmonavtika – 2014"*. Saint Petersburg: Masterskaia pechati, 2014, pp. 277-279.

2. Borovikov D.A., Seliverstov S.D., Ionov A.V., Bolkhovitin M.S. Razrabotka metodik sozdaniia VRD malykh tiag [The development of techniques for creating small thrust air-breathing jet engines]. *Materialy mezhdunarodnogo molodezhnogo foruma "Budushchee aviatsii i kosmonavтики za molodoi Rossiei"*. Rybinskii gosudarstvennyi aviatsionnyi tekhnicheskii universitet imeni P.A. Solov'eva, 2015, pp. 154-161.

3. Seliverstov, S.D., Borovikov D.A., Ionov A.V. Razrabotka mikro-GTD i metodik ikh proektirovaniia [Development of micro-gas turbine engines and methods of their design]. *Tezisy dokladov XX nauchno-tekhnicheskoi konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov*. Korolev, 2014, pp. 447-449.

4. AMT Netherlandswebsite. *Amtjets.com*, available at: <http://www.amtjets.com/Titan.php> (accessed 20 December 2014).

5. Agul'nik A.B., Bakulev V.I., Golubev V.A., Kravchenko I.V., Krylov B.A. Termogazodinamicheskie raschety i raschet kharakteristik aviatsionnykh GTD [Thermogasdynamics calculations and calculation of aero-derivative GTE characteristics]. Moskovskii aviatsionnyi institut, 2002. 257 p.

6. Rzhavin Iu.A., Emin O.N., Karasev V.N. Lopatochnye mashiny dvigatelei letatel'nykh apparatov. Teoriia i raschet: ucheb. posobie [Impeller machines of flight-type engines]. Moskovskii aviatsionnyi institut: Print, 2008. 700 p.

7. Rzhavin Iu.A., Karasev V.N. Termogazodinamicheskii raschet turbokompressora dlia agregata nadduva DVS [Thermogasdynamics calculation of turbo compressor for supercharging of internal combustion engines]. Moscow: Dipak, 2004. 45 p.

8. Chuian R.K. Metody matematicheskogo modelirovaniia dvigatelei letatel'nykh apparatov [Methods of mathematical modeling of aircraft engines. Study guide for students of aircraft engine construction specialities]. Moscow: Mashinostroenie, 1988. 288 p.

9. Bolkhovitin M.S., Ionov A.V., Seliverstov S.D. Razvitie oblasti primeneniia avtomatizirovannykh proizvodstvennykh sistem pri naturnom modelirovanii protsessov i konstruktsii LA [The development of the application of automated production systems in the natural modeling of processes and structures of aircraft]. *Tezisy dokladov XX nauchno-tekhnicheskoi konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov*. Korolev, 2014, pp. 398-400.

10. Seliverstov S.D., Bolkhovitin M.S., Ionov A.V. Opyt primeneniia avtomatizirovannykh proizvodstvennykh sistem v nauchnykh issledovaniyakh protsessov i konstruktsii LA [Experience of automated production systems use in the aircraft research processes and structures]. *Materialy mezhdunarodnogo molodezhnogo foruma "Budushchee aviatsii i kosmonavtiki za molodoi Rossiei"*. Rybinskii gosudarstvennyi aviatsionnyi tekhnicheskii universitet imeni P.A. Solov'eva, 2015, pp. 15-19.

Сведения об авторах

Боровиков Дмитрий Александрович (Москва, Россия) – студент Московского авиационного института (Национального исследовательского университета) (125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4, e-mail: deman.994@ya.ru).

Ионов Алексей Владимирович (Москва, Россия) – кандидат технических наук, ассистент, научный сотрудник кафедры технологии производства двигателей летательных аппаратов Московского авиационного института (Национального исследовательского университета) (125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4, e-mail: woln@mail.ru).

Селиверстов Сергей Дмитриевич (Москва, Россия) – студент Московского авиационного института (Национального исследовательского университета) (125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, 4, e-mail: kuroshup93@mail.ru).

About the authors

Borovikov Dmitry Alexandrovich (Moscow, Russian Federation) is a student Moscow aviation institute (National Research University) (125993, Moscow, 4, Volokolamskoeshosse, e-mail:deman.994@yandex.ru).

Ionov Alexey Vadimirovich (Moscow, Russian Federation) is Ph.D. in Technical Sciences, Assistant researcher of the Department of Technology of Production of Aircraft Engines Moscow Aviation Institute (National Research University) (125993, Moscow, 4, Volokolamskoeshosse, e-mail:woln@mail.ru).

Seliverstov Sergey Dmitrievich (Moscow, Russian Federation) is a student Moscow aviation institute (National Research University) (125993, Moscow, 4, Volokolamskoeshosse, e-mail:kuroshup93@mail.ru).

Получено 06.07.2015