

УДК 62-18

DOI: 10.12737/18170

В.В. Барсков, В.А. Рассохин, С.Н. Беседин, Е.В. Тулубенский

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИСПЫТАНИЙ МАЛОРАСХОДНЫХ ПРОТОЧНЫХ ЧАСТЕЙ ТУРБИНЫ И КОМПРЕССОРА

Рассмотрена возникающая при проектировании малоразмерных турбогенераторов проблема выбора оптимальной тепловой схемы и компоновки для получения максимального КПД установки. Описан опыт работы по созданию малоразмерных турбомашин. Указаны особенности разработанной установки и эффективность ее использования. Приведены основные способы повышения КПД уста-

новки и ограничения при его оптимизации. Даны рекомендации по выбору схемы и компоновки малоразмерного турбогенератора.

Ключевые слова: тепловая схема, компоновка, турбогенератор, малоразмерные турбомашин, отдельный привод, синхронный генератор, МГТГ.

V.V. Barskov, V.A. Rassokhin, S.N. Besedin, E.V. Tulubensky

TEST PROCEDURE DEVELOPMENT FOR LOW-SPENDING PARTS OF TURBINE AND COMPRESSOR

In 2014 for the realization of experimental investigation there was assembled a completed experimental plant for testing low-spending turbo-machines with the use of an inductor brake (IB) at the enterprise "Micro-turbine Techniques" Co. and was installed on a test board of the laboratory of the department "Turbines, Fluid Machines and Aviation Engines" of S-PbPU. In the structure of a test bench there is included an air system, oil system, system of control, measuring and information accumulation. From the air system air passes through a flow gage and delivered to IB. All tests will be agreed with the frequencies of rotor rotation in the course of which there were carried out measurements. According to values read of consumption, pressure, temperatures and efforts to a stator lever

of an inductor brake with the aid of PC software the parameters of a low-spending centrifugal-flow compressor (LCC) will be computed. The criterion of capacity equality consumed by LCC and taken off from a low-spending radial-axial turbine will be zero value of the effort on a stator lever of an inductor brake. As a result of the work performed the IB equipment is prepared, all systems of the test board are connected up. The systems of control, measuring and experimental data accumulation are connected up and adjusted. A visualization program is developed.

Key words: heat flow diagram, assembling, turbo-generator, low-sized turbo-machines, separate drive, synchronizing generator, MGTG.

В 2014 году для проведения экспериментального исследования была собрана доработанная экспериментальная установка для исследования малорасходных турбомашин с использованием индукторного тормоза (далее ЭУ) на предприятии «ООО «НТЦ «Микротурбинные технологии» и установлена на экспериментальном стенде лаборатории кафедры «Турбины, гидромашин и авиационные двигатели» СПбПУ[1].

Экспериментальная установка состоит из компрессора, индукторного тормоза, турбины, комплектов датчиков, приборов и рамы (рис. 1).

Основным элементом установки является нагрузочное устройство – индукторный тормоз (ИТ), позволяющий прово-

дить исследования турбомашин в широком диапазоне изменения мощности и частоты

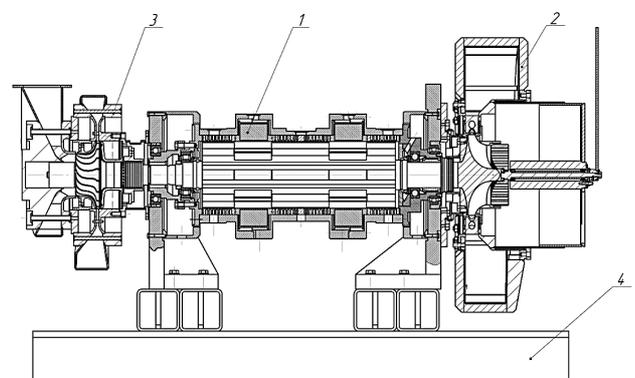


Рис. 1. Продольный разрез экспериментальной установки для исследования проточной части одноступенчатой турбины и одноступенчатого компрессора: 1 – индукторный тормоз; 2 – турбина; 3 – компрессор; 4 – рама

вращения.

Для исключения потерь мощности на трение в подшипниках вала применяется схема с взвешиванием подшипников вала в подшипниках корпуса тормоза (схема «подшипник в подшипнике»). ИТ является нагрузочным устройством при испытаниях турбины и определении характеристик приводной воздушной турбины. К корпусу тормоза крепится рычаг моментомера. На выходе из рабочего колеса турбины установлено колесо с осевыми отверстиями. К оси этого колеса также прикреплен рычаг моментомера. Применение двух моментомеров позволяет разделять потери кинетической энергии в исследуемой турбинной ступени на потери в сопловом аппарате, рабочем колесе и потери с выходной скоростью. Кроме того, ИТ позволяет предупреждать несанкционированный разгон ротора (аварийный режим) и предотвращать возникновение помпажа при испытаниях компрессоров [2;4].

В состав экспериментального стенда входят воздушная, масляная, водяная системы, система управления, измерения и сбора экспериментальных данных (СУИ и СЭД). Из воздушной системы воздух через расходомер подается на ЭУ.

Водяная система служит для бесперебойного охлаждения индукторного тормоза, а масляная система обеспечивает смазку подшипников качения индукторного тормоза. СУИ и СЭД собирает показания датчиков давления, температуры. Замер частоты вращения ротора обеспечивает оптоэлектронный датчик. Персональ-

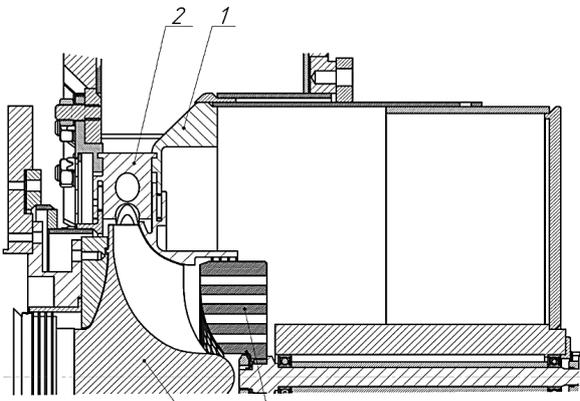


Рис. 2. Продольный разрез МРОТ: 1 – газосборник; 2 – сопловой аппарат; 3 – рабочее колесо; 4 – колесо с осевым выходом

ный компьютер (ПК) обрабатывает их показания и выдает на экран монитора ПК в реальном масштабе времени на мнемосхему. Управление задвижкой подачи воздуха также осуществляется с помощью ПК.

Проточная часть малорасходной радиально-осевой турбины (МРОТ) (рис. 2) для ЭУ создана на базе микротурбинного генератора МТГ100, разработанного в ООО «НТЦ «Микротурбинные технологии».

В качестве входного патрубка использован аналог улиточного входного патрубка от МТГ 100. Сопловой аппарат состоит из осесимметричных сопел, выполненных в общем корпусе. Рабочее колесо (РК) радиально-осевого типа крепится на роторе ИТ с помощью соединения Хирта, что позволяет центровать РК относительно оси вращения с высокой точностью, передавать большой крутящий момент при малых радиальных и осевых размерах и заменять РК при сравнительных испытаниях. Конструкция крепления соплового аппарата также позволяет заменять его при сравнительных испытаниях.

Проточная часть малорасходного центробежного компрессора (МЦК) (рис. 3) для ЭУ собрана на базе МТГ-100. Входной патрубок аналогичен входному патрубку компрессора МТГ-100.

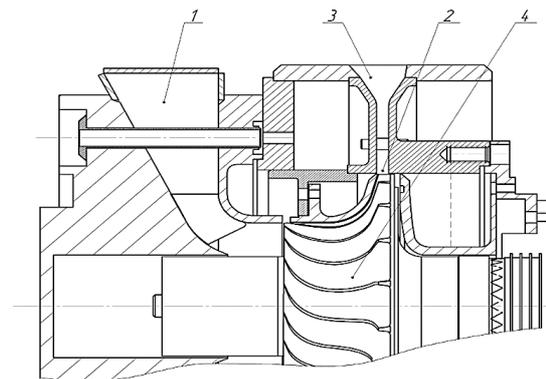


Рис. 3. Проточная часть МЦК: 1 – всасывающий патрубок; 2 – диффузор; 3 – входной патрубок; 4 – колесо компрессора

Рабочее колесо центробежного типа закреплено между двумя втулками, причем одна из втулок с помощью соединения Хирта крепится к валу ИТ. Это позволяет производить замену рабочего колеса ком-

прессора при сравнительных испытаниях или заменять его на втулку при испытаниях МРОТ. За рабочим колесом находится безлопаточный диффузор. При сравнительных испытаниях необходима замена лопаточного диффузора, что представляет значительную сложность. Поэтому в данной конструктивной схеме был выбран безлопаточный диффузор.

Выходной патрубок сложной формы удовлетворяет противоречивым требованиям при создании единичной конструкции. Так, конусная часть со стороны входа в компрессор выполнена под углом 38° , что значительно сократило осевой габарит улитки в этом направлении. Конусная часть со стороны турбины выполнена под углом 8° с последующим переходом в улиточную часть с вертикальной образующей. Площадь проходных сечений патрубка соответствует площади теоретически обоснованного выходного патрубка. Выходной

участок улитки обеспечивает трансформацию пятиугольного проходного сечения в круглое. Для исключения попадания посторонних предметов на фланце входного патрубка установлена сетка в виде коробчатой конструкции.

СУИ и СЭД состоит из щита управления, шкафа управления, ЭУ с установленными датчиками и персонального компьютера (ПК). Перечень средств измерения приведен в табл. 1.

Все управление и отображение информации выведено на экран монитора ПК. ПК связан со щитом управления и шкафом управления по шине PS486.

При появлении аварийных сигналов (превышение оборотов, повышение давления масла, воды) мгновенный останов осуществляется вручную от красной кнопки, расположенной на щите управления, или от ПК. Кроме загорания лампочек аварийных сигналов раздается звуковая сирена.

Таблица 1

Используемые в СУИ и СЭД средства измерения

Датчик	Обозначение	Погрешность, %
Давления	АИР-20/М2-ДИВ	0,5
Силы	Л6N-С3-20Кд-3В6	0,02
Частоты	ВИКО-МС-11-М18Ж	0,42
Температуры	Хромель-копелевые термопары	0,5

Работы на ЭУ будут проводиться в несколько этапов:

1. Опробование работы ЭУ в целом.
2. Проверка работы масляной и водяной систем (возможность обеспечения необходимого расхода воздуха от воздушной системы; работа СУИ и СЭД в части регулирования частоты вращения ротора и опроса всех датчиков в заданных пределах измерений).
3. Отладка программного обеспечения с целью визуализации процесса на одном из стационарных режимов. Показания всех датчиков будут выведены на экран монитора ПК согласно схемам испытаний проточной части МЦК (рис. 4б) и МРОТ (рис. 4а).

4. Испытание проточной части МРОТ. При этом ЭУ будет разобрана в части компрессора. Рабочее колесо компрес-

сора будет заменено втулкой. ЭУ вновь будет собрана.

Испытание проточной части МРОТ будет проводиться на различных частотах вращения ротора. По снятым значениям расхода, давления, температур и усилий на рычаге статора индукторного тормоза и рычаге моментомера с помощью программы на ПК будут рассчитаны параметры МРОТ.

5. Испытание проточной части МЦК. Проточная часть МЦК будет разобрана с целью замены втулки на рабочее колесо. МРОТ будет использоваться в качестве приводной воздушной турбины.

Все испытания будут привязаны к частотам вращения ротора, при которых проводились замеры. По снятым значениям расхода, давления, температур и усилий на рычаге статора индукторного тормоза с помощью программы на ПК будут расчи-

таны параметры МЦК. Критерием равенства мощности, потребляемой МЦК и отбираемой от МРОТ, будет нулевое значение усилия на рычаге статора ИТ.

Целями экспериментального исследования являются:

- апробирование работы ЭУ совместно с СУИ и СЭД;
- отладка программного обеспечения;
- испытание проточной части турбины на различных частотах вращения ротора;
- испытание проточной части компрессора на различных частотах вращения ротора.

В процессе эксперимента определяются следующие величины:

- P_0^* – полное давление на входе в сопловой аппарат, Па;
- T_0^* – температура торможения на входе в сопловой аппарат, К;
- P_a – барометрическое атмосферное давление, Па;

- P_{I-} – усилие на конце рычага индукторного тормоза, Н;

- P_M – усилие на конце рычага моментомера, установленного за рабочим колесом, Н;

- n_1 – частота вращения ротора индукторного тормоза, об/мин;

- $P_{1ш}$ – давление перед мерной шайбой, Па;

- $T_{1ш}$ – температура перед мерной шайбой, К;

- $\Delta P_{1ш}$ – перепад давлений на мерной шайбе, Па;

- P_{li} – статическое давление на входе в рабочее колесо на периферии ступени, Па;

- P_{mi} – статическое давление за рабочим колесом перед моментомером на периферии проточной части, Па;

- L_I – длина рычага индукторного тормоза, м;

- L_M – длина рычага моментомера, установленного за рабочим колесом, м.

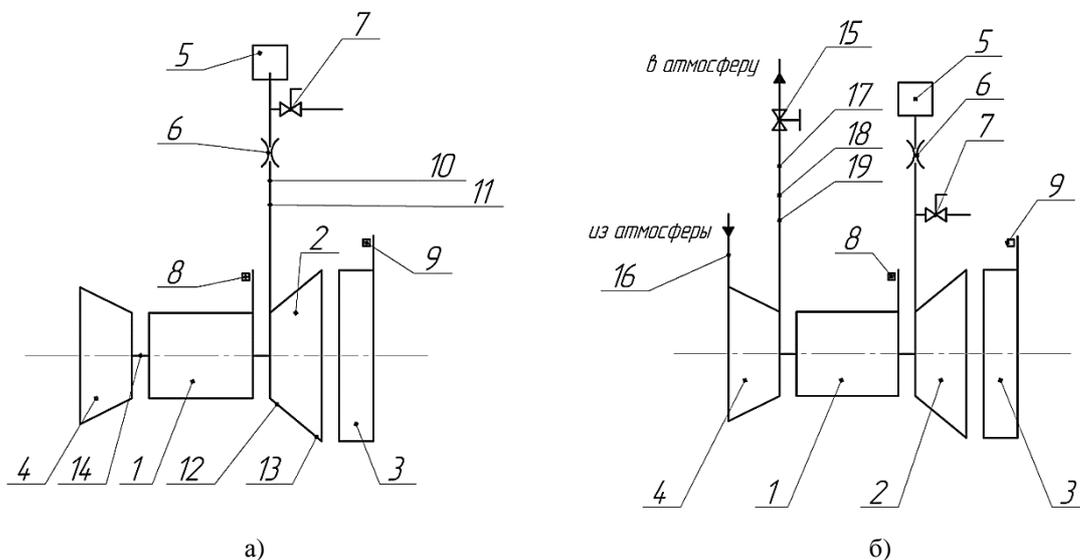


Рис. 4. Схемы испытаний проточной части МРОТ (а) и МЦК (б):

- 1 – индукционный тормоз; 2 – турбина; 3 – колесо с осевым выходом; 4 – статор компрессора; 5 – компрессор K500; 6 – расходомер; 7 – предохранительный сбросной клапан; 8, 9 – датчики силы; 10 – два датчика давления; 11 – датчик температуры; 12 – датчик статического давления на входе в РК; 13 – датчик статического давления на выходе из РК; 14 – датчик частоты; 15 – шиберная заслонка; 16 – датчик температуры атмосферного давления находится в блоке управления); 17 – три датчика температуры (через 120° по окружности); 18 – три датчика статического давления (через 120° по окружности); 19 – четыре датчика динамического давления

Исследование малорасходных, мало-размерных проточных частей связано с ря-

дом ограничений по возможности организации замеров в неравномерном потоке

[6;7]. Неравномерность потока объясняется малой высотой лопаток, их небольшим количеством и криволинейным характером косых срезов сопел [4]. Вследствие этого поток рабочего тела на выходе из соплового аппарата представляет собой систему струй, что приводит к сильной неравномерности течения как по высоте, так и по шагу. Размещение приборов в контрольных сечениях проблематично из-за соразмерности канала и зонда прибора. Получение характеристик потока при осреднении результатов траверсирования связано с многократными измерениями параметров потока в исследуемых сечениях и дальнейшей аналитической обработкой результатов. Таким образом, на погрешность измерений накладывается погрешность вычислений, связанная с выбором метода осреднения [3]. Все это приводит к недопустимым погрешностям. Достоверным способом получения интегральных характеристик потока является осреднение с помощью суммирующих приборов - моментометров, измеряющих момент количества движения потока рабочего тела. Входящая в состав прибора спрямляющая решетка моментометра частично моделирует лопаточный аппарат рабочего колеса.

Для осреднения потока рабочего тела с помощью моментометра необходимо решить систему из четырех уравнений:

- уравнение сохранения полной энергии;
- уравнение сохранения массы;
- уравнение сохранения моментов количества движения в окружном направлении;
- уравнение осреднения статического давления.

Для решения этой системы приняты следующие допущения:

- радиальная составляющая скорости $C_r = 0$;
- рабочее тело - идеальный газ;
- температура торможения на выходе из соплового аппарата постоянна.

Для определения характеристик соплового аппарата с использованием сделанных допущений имеем следующую систему уравнений [2]:

$$\begin{cases} T_0^* = \text{const}; \\ G_{\Sigma} = P c_{1z} F_1; \\ M_{1u} = c_{1u} r_{1cp} G_{\Sigma}; \\ P = (1/F) \int p dF. \end{cases}$$

Для решения системы необходимо конкретизировать взаимозависимость основных величин:

1. Уравнение состояния: $P_1 = R T_1$.
2. Уравнение энергии: $c_1^2 / 2 = c_p (T_0^* - T_1)$.
3. Уравнение связи скоростей: $c_1^2 = c_{1z}^2 + c_{1u}^2$.

В этих уравнениях величины T_0^* , G_{Σ} , M_{1u} , P_1 известны из эксперимента. Известна также кольцевая площадь соплового аппарата F_1 .

Так как в системе уравнений используется условие сохранения момента количества движения, то в качестве неизвестного в уравнение входит радиус. Одномерный расчет малорасходных турбинных ступеней проводится по среднему радиусу, поэтому целесообразно использовать среднеарифметический радиус. Решая полученную систему уравнений с дополнительными соотношениями, находим проекции скорости c_1 :

$$\begin{aligned} c_{1u} &= M_{1u} / (r_{1cp} G_{\Sigma}); \\ c_{1z} &= -A + \sqrt{A^2 + 2c_p T_0^* - c_{1u}^2}; \\ A &= F_1 r_{1cp} / (G_{\Sigma} R). \end{aligned}$$

Знак «+» перед радикалом выбран исходя из физического смысла задачи.

Зная проекции скоростей, находим остальные параметры потока за исследуемым сопловым аппаратом и определяем его газодинамические характеристики:

- коэффициент расхода μ_p ;
- коэффициент скорости φ_{Σ} ;
- коэффициент суммарных потерь кинетической энергии $\zeta_{1\Sigma}$;
- действительный угол выхода потока из соплового аппарата α_1 .

Оценка эффективности работы ступени компрессора или турбины должна быть достаточно точной. Анализ точности опытных данных и погрешности измерений параметров необходим как для правильного выбора измерительных прибо-

ров, так и для достоверной оценки полученных результатов.

В работе дана оценка точности измерений параметров применительно к аналогичному экспериментальному стенду.

Максимальная абсолютная погрешность величин, измеряемых при экспериментальных исследованиях малорасходных турбин и их элементов, приведена в табл. 2.

Таблица 2

Максимальная абсолютная погрешность величин

Величина	Размерность	Значение	Погрешность
P_1	кг	3,373	0,003
n_1	об/мин	33230	10
P_{1T}	МПа	0,3373	0,02
T_{1T}	К	343	0,5

Результаты расчета абсолютной и относительной погрешностей основных величин, определяющих эффективность ис-

пытанных модельных ступеней, представлены в табл. 3.

Таблица 3

Абсолютная и относительная погрешности основных величин

Величина	Размерность	Абсолютная погрешность	Относительная погрешность
N_B	кВт	0,09	0,3
G	кг/с	0,009	1,7
H_0^*	кДж/кг	0,35	0,23
η_B	%	0,015	1,63

Для увеличения точности величин, дающих наибольшую погрешность, применяется многоуровневое повторение замеров значений определяющих параметров во всем диапазоне $\pi_1 \omega / C_0 N_B$ [3].

Обработка опытных данных при определении мощности турбины выполняется в следующей последовательности:

1. Момент на валу тормоза:

$$M_1 = P_1 L (H \cdot m).$$

2. Мощность, развиваемая турбиной:

$$N_1 = M_1 \frac{\pi n_1}{30} (\text{Вт}).$$

3. Момент количества движения потока за РК, измеренный моментомером: $M_{2u} = P_m L_m (H \cdot m)$.

Полученные значения P_1 и P_m используются в дальнейшем при испытаниях проточной части МЦК. Расчетная мощность, развиваемая приводной воздушной турбиной, определяет максимальную мощность, затрачиваемую при сжатии компрессорной ступенью.

В результате работы подготовлена материальная часть ЭУ, подключены все системы экспериментального стенда. Подключены и отработаны системы управления, измерения и сбора экспериментальных данных. Разработана программа визуализации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Беседин, С.Н. Научно-техническое обоснование и практическая реализация создания микротурбинного генератора мощностью 100 кВт на основе современных расчетно-экспериментальных методов: дис. ... канд. техн. наук /С.Н.Беседин.– СПб., 2011.– 298 с.
- Кириллов, И.И. Теория турбомашин/ И.И. Кириллов. – 2-е изд. перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1972.– 533 с.
- Соколов, Н.П. Энергетические машины: Определение величины погрешности при экспериментальных исследованиях: учеб. пособие/Н.П. Соколов [и др.]; под ред. В. А. Рассохина, В. Г.

- Полищука.– СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2008.– 207 с.
4. Галеркин, Ю.Б. Турбокомпрессоры: учеб. пособие/ Ю. Б. Галеркин, Л. И. Козаченко; С.-Петербург. гос. политехн. ун-т.– СПб., 2008.
 5. Андреев, К.Д. Энергетические машины: Теплообмен в системах охлаждения газовых турбин : учеб. пособие/ К.Д. Андреев [и др.]; под ред. В.А. Рассохина, В.Г. Полищука.– СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008.– 294 с.
 6. Беседин, С.Н. Разработка и создание автономных энергетических установок малой мощности на базе газотурбинного цикла простой схемы с сильно развитой системой регенерации тепла/ С.Н. Беседин [и др.] // Инновационная политика и изобретатели (Россия - начало XXI века) : материалы межрегион. науч.-техн. конф. изобретателей и каталог Городской выставки изобретений (28-29 апр. 2009 г.) / Творческий союз изобретателей Санкт-Петербурга; С.-Петербург. гос. политехн. ун-т; под ред. Ю. Г. Попова, А. Г. Семёнова.– СПб., 2010.–С. 58-61.- (Энергетика и энергетическое машиностроение).
 7. Шарова, Н.А. Оценка состояния развития и применимости современных материалов для деталей турбины перспективного авиационного двигателя / Н.А.Шарова, А.А.Живушкин, А.Л.Барабаш, Е.А.Тихомирова // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия «Наука и образование». - 2010. - № 2-2 (100). –С. 93-98.
 1. Besedin, S.N. Scientific and Technical Basis and Practical Realization of Micro-Turbine Generator Creation with Capacity of 100 kWt on Basis of Modern Computation Experimental Methods: Thesis for Can.Eng. Degree /S.N. Besedin. – S-Pb., 2011.– pp. 298.
 2. Kirillov, I.I. Theory of Turbo-Machines/ I.I. Kirillov. – 2-d Edition revised and suppl. – L.: Mechanical Engineering, 1972. – pp. 533.
 3. Sokolov, N.P. Energy-Converting Machinery: Definition of Values of Error at Experimental Investigations: Manual/N.P. Sokolov [et al.]; under the editorship of V.A. Rassokhin, V.G. Polishchuk.– S-Pb.: Publishing House of Polytechnic University, 2008.– pp. 207.
 4. Galerkin, Yu.B. Turbo-compressors: Manual/ Yu.B. Galerkin, L.I. Kozachenko; S-Petersb. State Polytechnic. University.– S-Pb., 2008.
 5. Andreyev, K.D. Energy-Converting Machinery: Heat Exchange in Cooling Systems of Gas Turbines: Manual/ K.D. Andreyev [et al.]; under the editorship of V.A. Rassokhin, V.G. Polishchuk.– S-Pb.: Publishing House of Polytechnic University, 2008.– pp. 294.
 6. Besedin, S.N. Development and creation of low-powered standalone energy installations on basis of gas turbine cycle of simple circuit with highly developed system of heat recovery/ S.N. Besedin [et al.] // Innovation Policy and Inventors (Russia – beginning of the XXI-st Century): Proceedings of Inter-regional Scientific-Technical Conf. of Inventors and Catalogue of the City Exhibition of Inventions (April 28-29, 2009) / Creative Union of Inventors of Saint - Petersburg; S-Pb. State Polytech University; under the editorship of Yu.G. Popov, A.G. Semyonov.– S-Pb., 2010.– pp. 58-61.- (Energy and Power Machine Building).
 7. Sharova, N.A. Estimation of development state and modern material applicability for parts of turbines for promising aviation engine / N.A. Sharova, A.A. Zhivushkin, A.L. Barabash, E.A. Tikhomirova // Scientific-Technical Bulletin of S-Pb.SPU. Series “Science and Education”. - 2010. - № 2-2 (100). – pp. 93-98.

Статья поступила в редколлегию 21.12.2015.

Рецензент: д.т.н., профессор Рассохин В.А.

Сведения об авторах:

Рассохин Виктор Александрович, д.т.н., профессор кафедры «Турбины, гидромашин и авиационные двигатели» СПбГПУ, e-mail: v-rassokhin@yandex.ru.

Барсков Виктор Валентинович, аспирант кафедры «Турбины, гидромашин и авиационные двигатели» СПбГПУ, e-mail: viktorbarskov@ntcmitt.ru.

Rassokhin Victor Alexandrovich, D.Eng., Prof. of the Dep. “Turbines, Hydro-Machines and Aviation Engines” S-Pb SPU, e-mail: v-rassokhin@yandex.ru.

Barskov Victor Valentinovich, Post graduate student of the Dep. “Turbines, Hydro-Machines and Aviation Engines” S-PbPU, e-mail: viktorbarskov@ntcmitt.ru.

Беседин Сергей Николаевич, к.т.н., ген. директор ООО «НТЦ «Микротурбинные технологии», e-mail: sb68595@gmail.com.

Тулубенский Евгений Викторович, аспирант кафедры «Тепловые двигатели» Брянского государственного технического университета, e-mail: evgen.tulubensky@gmail.com.

Besedin Sergey Nikolayevich, Can.Eng., Director-General of “STC “Micro-Turbine Techniques”, e-mail: sb68595@gmail.com.

Tulubensky Eugene Victorovich, Post graduate student of the Dep. “Heat-Engines”, Bryansk State Technical University, e-mail: evgen.tulubensky@gmail.com.