

УДК 621.438

РАЗРАБОТКА МАКЕТНОГО ОБРАЗЦА КОСМИЧЕСКОЙ ЗАМКНУТОЙ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

© 2014 А.Н. Арбеков, Б.Б. Новицкий

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Целью работы является разработка макетного образца многопетлевой замкнутой газотурбинной энергетической установки, позволяющей моделировать космические энергоустановки мощностью от десятков до сотен кВт, предназначенных для питания электроракетных или тепловых с электрическим нагревом двигателей, а также мощных систем энергообеспечения космических аппаратов различного назначения. Создание макетного образца позволит исследовать совместную работу двух газотурбинных преобразователей энергии в едином газовом контуре от общего нагревателя (в качестве которого выступает имитатор-электронагреватель), построить алгоритм управления модулями в переходных процессах, исследовать процессы пуска и останова модулей, а также выбрать оптимальный алгоритм управления пуском и выявить принципиальные проблемы в устройстве и конструкции установки на ранних этапах создания космических многопетлевых установок. В работе проведены оценки основных параметров замкнутой газотурбинной установки и выполнена оптимизация цикла для возможности использования имеющихся узлов. Представлен алгоритм расчёта. Исходя из полученных данных, в качестве рабочего тела была выбрана геликсеноновая смесь с молярной массой 83,9 кг/кмоль, являющаяся термодинамическим аналогом криптона. Представлены параметры многопетлевой замкнутой газотурбинной установки и компоновочный вариант двухпетлевой замкнутой газотурбинной установки.

Геликсеноновая смесь, многопетлевая замкнутая газотурбинная установка, космический аппарат, макетный образец.

Введение

Современные космические аппараты сложно представить без бортовых систем энергообеспечения. Широко распространённые солнечные батареи имеют ряд существенных недостатков, а именно низкую мощность (на квадратный метр приходится всего лишь 1400 Вт), слабую защиту от космического мусора и низкое напряжение. Для решения данных проблем имеет смысл использовать альтернативные энергетические установки с тепловым аккумулятором солнечного излучения или ядерным реактором в качестве нагревателя и с замкнутой газотурбинной установкой (ЗГТУ) в качестве машинного преобразователя тепловой энергии в электричество. Однако создание мощной энергетической установки требует не только понимания физических принципов её работы и использования математического моделирования процессов, происходящих в ней, но и экспериментальных данных, полученных при испытаниях подобных установок, их критических узлов, а также масштабных моделей, способных существенно снизить капиталовложения.

Постановка задачи

Как и все динамические машины, газотурбинная установка обладает гироскопическим моментом, негативно влияющим на ориентацию космического аппарата, поэтому для его компенсации применяют несколько (2...4) газотурбинных установок. Работы по исследованию многопетлевых ЗГТУ начались в США в Национальном управлении по воздухоплаванию и исследованию космического пространства (National Aeronautics and Space Administration) в Исследовательском центре имени Дж. Г. Гленна, где две модифицированные установки Capstone C30 объединили в единый газовый контур [1]. В нашей стране под руководством В.Л. Самсонова был создан макетный образец ЗГТУ, подтвердивший свою работоспособность и представленный в докладе [2]. На основе результатов многолетних работ по проектированию и созданию ЗГТУ, выполненных в НИИЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана, было решено разработать макетный образец многопетлевой замкнутой газотурбинной установки на смесях инертных газов для работы двух и более

машинных преобразователей энергии в едином газовом контуре от единого нагревателя. Макетный образец позволит решить спектр следующих задач:

- исследование совместной работы двух газотурбинных преобразователей энергии в едином газовом контуре от общего нагревателя,
- совместная работа модулей ЗГТУ на номинальном режиме и отработка работы на режиме собственных нужд,
- исследование процессов пуска и останова модулей, а также выбор оптимального алгоритма управления пуском,
- исследование переходных процессов,
- построение алгоритма управления модулями ЗГТУ в переходных процессах,
- исследование аварийных и форсированных режимов работы установки,
- выявление принципиальных проблем в устройстве и конструкции установки.

Данная статья является продолжением работы [3].

Выбор параметров ЗГТУ

В качестве основы макетного образца будут использованы основные узлы ЗГТУ, такие как блок турбогенератора-компрессора (ТГК, представлен на рис. 1), концевой охладитель, рекуператор и нагреватель. Поэтому необходима оптимизация цикла ЗГТУ для возможности использования имеющихся узлов.



Рис. 1. Блок и ротор турбогенератора-компрессора замкнутой газотурбинной установки

Мощность электрического нагревателя составляет 30 кВт, следовательно, его использование гарантированно обеспечивает требуемую теплоту для работы 2-х блоков ТГК, включенных в схему в соответствии с рис. 2.

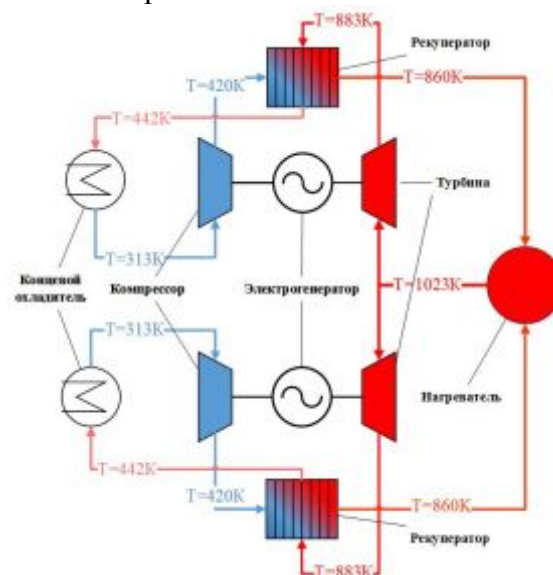


Рис. 2. Схема двухтurbинной замкнутой газотурбинной установки с единым нагревателем

Поскольку замкнутая газотурбинная установка не связана с внешней средой, состав рабочего тела и его параметры можно выбирать произвольно, исходя из условий максимальной эффективности узлов ЗГТУ и требуемой мощности. Согласно работам [4, 5] ЗГТУ небольшой мощности имеют наибольшую эффективность при работе на смесях гелия и ксенона с высокими молярными массами 60...90 кг/кмоль. На рис. 3 и 4 представлены зависимости степени регенерации в рекуператоре и потери давления в контуре от молярной массы рабочего тела, соответственно. Расчёт проводился по методике, изложенной в [9].

При уменьшении молярной массы рабочего тела возрастает работа турбомашин, и, следовательно, требуется увеличение частоты вращения. Исходя из условий прочности и особенностей элетрогенератора блока ТГК, была выбрана гелие-ксеноновая смесь с молярной массой 83,8 кг/кмоль, являющаяся термодинамическим аналогом криптона.

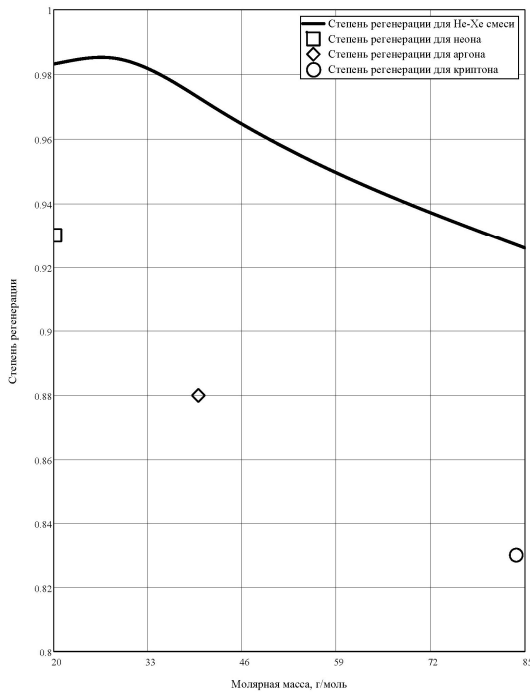


Рис. 3. Зависимость степени регенерации от молярной массы теплоносителей

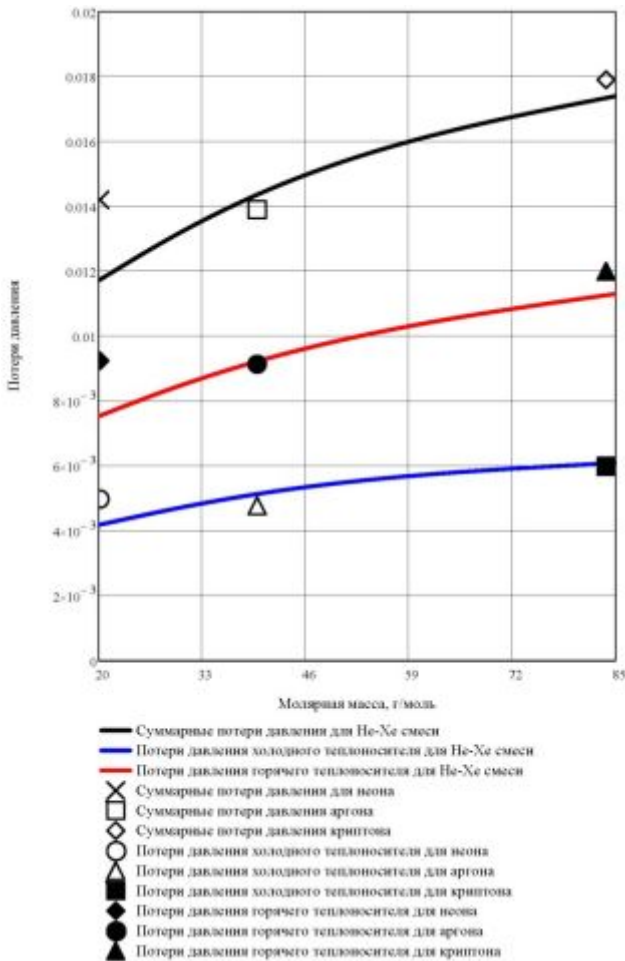


Рис. 4. Зависимость потерь давления от молярной массы теплоносителей

Оптимизация цикла ЗГТУ проводилась по известным зависимостям [6 - 10] для определения:

1) температуры торможения за компрессором

$$T_K^* = T_0 \cdot \left[1 + (\pi_k^{\frac{k-1}{k}} - 1) \cdot \frac{1}{\eta_k} \right];$$

где k – показатель адиабаты;

π_k - степень повышения давления в компрессоре;

T_0 - температура при входе в компрессор;

η_k – ожидаемый КПД компрессора;

2) температуры торможения за турбиной

$$T_T^* = T_T \cdot \left[1 - \pi_T^{\frac{1-k}{k}} \right] \cdot \eta_T;$$

где η_T – ожидаемый КПД турбины;

T_T - температура рабочего тела при входе в турбину;

π_T - степень понижения давления в турбине;

3) расхода рабочего тела через компрессор

$$G_K = \frac{N_E}{\eta_{мех} \cdot \eta_{ген} \cdot ((1 - \sigma_{пот}) \cdot L_T - L_K)};$$

где N_E - электрическая мощность на клеммах генератора;

$\eta_{ген}$ – ожидаемый к.п.д. генератора;

$\eta_{мех}$ – ожидаемый механический к.п.д.;

$\sigma_{пот}$ – коэффициент перетечек рабочего тела вдоль ротора;

L_T - удельная работа турбины;

L_K - удельная работа компрессора;

4) к.п.д. установки

$$\eta_e = \frac{N_E}{C_P \cdot G_K \cdot (1 - \sigma_{пот}) \cdot (T_T - T_{PEГ})}.$$

На параметры цикла замкнутой газотурбинной установки оказывают влияние потери давления в контуре и перетечки рабочего тела вдоль ротора. На рис. 5 представлена зависимость к.п.д. на клеммах электрогенератора от степени повышения давления и коэффициента сохранения давления в контуре, который зависит

от потерь давления в подводящих и отводящих патрубках, лопаточных машинах, а также в теплообменных аппаратах (концевом охладителе, рекуператоре, нагревателе). Перетечки вдоль ротора определяют по эмпирической зависимости

$$\sigma_{пот} = f(d, n_s, z, \delta),$$

где d - диаметр, на котором расположены лабиринтные уплотнения;

n_s - количество лабиринтных уплотнений;

z - количество «гребешков» лабиринтных уплотнений;

δ - зазор в лабиринтном уплотнении.

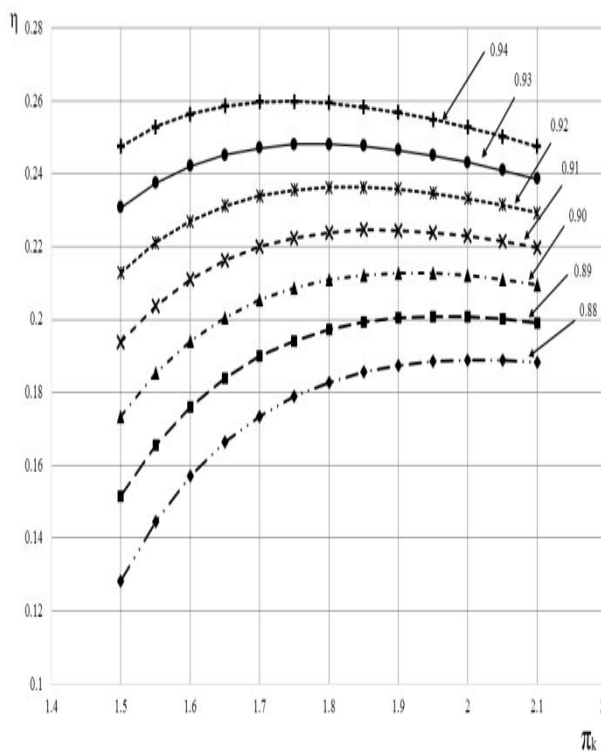


Рис. 5. Зависимость к.п.д. замкнутой газотурбинной установки от степени повышения давления и коэффициента сохранения полного давления в контуре

В результате проведённой оптимизации цикла были определены основные параметры многопетлевой замкнутой газотурбинной установки с геликсеноновой смесью с молярной массой 83,8 кг/кмоль в качестве рабочего тела (табл. 1).

Таблица 1 - Параметры многопетлевой замкнутой газотурбинной установки

Параметр	Ед. измерения	Значение
Расход рабочего тела через компрессор	кг/с	0,32
Степень повышения давления в компрессоре	-	1,75
Давление за компрессором	Па	233275
Температура за компрессором	К	419,11
Мощность компрессора	Вт	8483,17
Мощность турбины	Вт	11705,51
Степень расширения в турбине	-	1,59
Температура перед турбиной	К	1023
Температура за турбиной	К	873,59
Частота вращения ротора	1/мин	40000
Подведённая теплота в рекуператоре	Вт	33825,2
Подведённая теплота в нагревателе	Вт	13485,78
Отведённая теплота в концевом охладителе	Вт	10093,78
Мощность на клеммах генератора одной петли	Вт	3000
К.п.д. одной петли	-	0,22

Компоновочная схема макетного образца многопетлевой ЗГТУ

Компоновка стенда создаётся с требованиями минимизации габаритных размеров конструкции на основе имеющихся узлов опытной ЗГТУ. Это потребовало рассмотрения нескольких вариантов компоновки. Минимизация габаритов стенда выполнена для снижения гидравлических потерь в контуре, которые оказывают существенное влияние на работоспособность и эффективность ЗГТУ. При разработке стенда учитывались особенности вентиляции помещения, а также ограничения по возможному тепловыделению. Именно поэтому выбор пал на двухкорпусный двухходовой электрический нагреватель, позволяющий минимизировать тепловое выделение в помещение, что необходимо для стабильной работы концев-

вых охладителей и позволяет поддерживать расчётную температуру перед компрессорами. При проектировании двухпетлевой установки (рис. 6) особое внимание уделялось симметричности петель и равенству потерь давления в них.

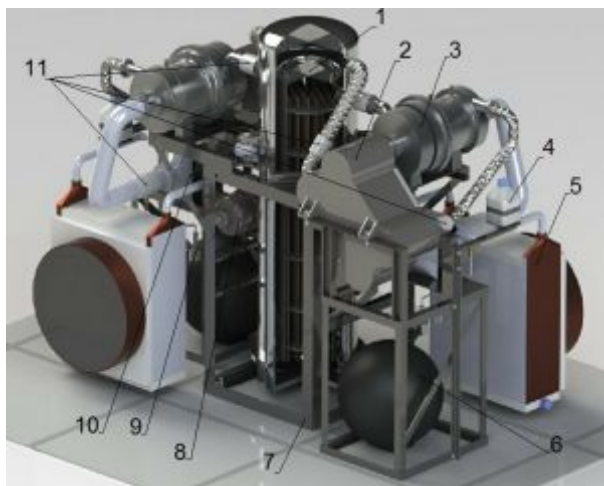


Рис. 6. Компонировка стенда: 1- электронагреватель с двойной стенкой; 2 - рекуператор; 3 – блок ТГК; 4 – расширительный бак; 5 – радиатор конечного охладителя; 6 – бак подпитки рабочего тела; 7 – рама; 8 – насос для прокачки промежуточного охладителя; 9 – система подпитки рабочего тела; 10 - конечной охладитель промежуточного рабочего тела; 11 – сильфоны

В ЗГТУ большое значение имеют также утечки теплоты от горячих частей (рекуператор, нагреватель, турбина, газопроводы между ними), что привело к необходимости обеспечения наименьшей длины тракта горячего теплоносителя, а,

следовательно, максимального приближения турбины к электронагревателю, а рекуператора к турбине. Исходя из этих соображений, рекуператор был развёрнут и присоединён к фланцу патрубка, идущего от турбины. Из-за особенностей размещения рекуператора на раме были изменены фланцы (подводящие и отводящие). Все вышеперечисленные изменения моделей позволили минимизировать расстояние между турбиной и рекуператором, что способствует снижению потерь теплоты между турбиной и рекуператором.

Заключение

На основании вариантных расчётов и моделирования компоновочных решений разработан макетный образец двухпетлевой замкнутой газотурбинной установки, отвечающий требованиям технического задания. Данный макетный образец предназначен для исследования проблем совместной работы двух модулей ЗГТУ с единым газовым контуром и определения оптимальных алгоритмов управления одноконтурными многопетлевыми замкнутыми газотурбинными установками космического назначения.

Работа выполнена при частичной поддержке Минобрнауки РФ (госзадание № 2014/104, код проекта 2092).

Библиографический список

1. Hervol D.S., Briggs M., Owen A.K., Lavelle T.A. Experimental and analytical performance of a Dual Brayton Power Conversion System // 6th International Energy Conversion Engineering Conference, IECEC. 2008. Article number 2008-5735.

2. Голубев С.В. и др. Испытания опытного образца модуля ЗГТЭУ $N_e = 1...3$ кВт, работающей на природном газе // Тезисы докладов 11-й Межвузовской конференции «Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели». М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. С. 119.

3. Арбеков А.Н., Новицкий Б.Б. 77-30569/227752 Исследование возможности создания макетного образца двухпетлевой

замкнутой газотурбинной энергетической установки мощностью 6 кВт // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2011. № 13. С. 27.

4 Манушин Э.А., Бекнев В.С., Осипов М.И., Суровцев И.Г. Ядерные газотурбинные и комбинированные установки. М.: Энергоатомиздат, 1993. 272 с.

5. Манушин Э.А., Михальцев В.Е., Чернобровкин А.П. Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок. М.: Машиностроение, 1977. 447 с.

6. Михальцев В.Е., Моляков В.Д. Расчёт цикла газотурбинной установки: учебное пособие / под ред. И.Г. Суровце-

ва. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 32 с.

7. Бекнев В.С., Куфтов А.Ф., Тумашев Р.З. Методическое указание по расчёту и проектированию центробежных компрессоров ГТД. М.: МГТУ, 1996. 41 с.

8. Митрохин В.Т. Выбор параметров и расчет центростремительной турбины. М.: Машиностроение, 1974. 226 с.

9. Иванов В.Л., Леонтьев А.И., Манушин Э.А., Осипов М.И. Теплообменные аппараты и системы охлаждения газотурбинных и комбинированных установок / под ред. А.И. Леонтьева. М.: МГТУ им. Баумана, 2004. 592 с.

10. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / под ред. М.О. Штейнберга. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.

Информация об авторах

Арбеков Александр Николаевич, кандидат технических наук, заведующий отделом Научно-исследовательского института Энергомашиностроения, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана. Область научных интересов: исследование характеристик малоразмерного центробежного компрессора.

Новицкий Бронислав Брониславович, младший научный сотрудник Научно-исследовательского института Энергомашиностроения, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана. E-mail: novitskiybronislav@yandex.ru. Область научных интересов: исследование характеристик малоразмерного центробежного компрессора.

DEVELOPMENT OF A PROTOTYPE OF A MULTI-LOOP CLOSED-BRAYTON CYCLE GAS TURBINE POWER SYSTEM

© 2014 A.N. Arbekov, B.B. Novitskiy

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Aim is to develop the prototype of a multi-loop closed-Brayton Cycle gas turbine power system, which allows to simulate the cosmic power plant capacity from tens to hundreds of kW intended for food or electrorocket thermal engines with electric heating, as well as the powerful energy systems of spacecraft for various purposes. Creating a prototype model allows to study the joint operation of two gas-turbine power converters in a single circuit of the total gas heater (which acts as an electric heater), build a control algorithm modules in transitional processes, investigate the processes of starting and stopping of the modules, as well as select the optimal control algorithm starting and to identify the fundamental problems in the design and construction of the installation in the early stages of development of space multiloop systems. The paper contains estimates of the main parameters of a closed gas turbine plant and the optimization cycle to allow the use of existing sites. Also presented an algorithm for calculating. Based on the data as the working fluid was chosen geliexenonovaya mixture with a molar mass of 83.9 kg/kmol, which is an analogue of the thermodynamic krypton. The parameters of a multi-loop closed gas turbine plant and layout version of the two-loop closed-Brayton Cycle gas turbine power system.

Xenon and helium mixture, multiloop closed-brayton cycle gas turbine power system, spacecraft, mockup.

References

1. Hervol D.S., Briggs M., Owen A.K., Lavelle T.A. Experimental and analytical performance of a Dual Brayton Power Conversion System // 6th International Energy Conversion Engineering Conference, IECEC. 2008. Article number 2008-5735.
2. Golubev S.V. Tests of a prototype module ZGTEU Ne = 1 ... 3 kW, a natural gas // Abstracts of papers 11th Interuniversity Conference "Gas turbine and combined and engines". Moscow: Moscow State Tech. Univ. Publ., 2000. P. 119. (In Russ.)
3. Arbekov A.N., Novitsky B.B., Kolosov N.F., Research opportunities with the building-the prototype of the two-loop closed-Brayton gas turbine power plant with a capacity of 6 kW // Science and Education. Electronic scientific and technical journal. 2011. No. 13. P. 27. (In Russ.)
4. Manushin E.A., Beknev V.S., Osipov M.I., Surovtsev I.G. Yadernye gazoturbinnye i kombinirovannye ustanovki [Nuclear gas turbine and combined installatio]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1993. 272 p.
5. Manushin E.A. Mikhaltsev V.E., Chernobrovkin A.P. Teoriya i proektirovanie gazoturbinnnykh i kombinirovannykh ustanovok [Theory and designing of the gas turbine and combined plants]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1977. 447 p.
6. Mikhaltsev V.E., Molyakov V.D. Raschet tsikla gazoturbinnoy ustanovki: uchebnoe posobie / pod red. I.G. Surovtseva [Payment cycle gas turbine plant: textbook / ed. by I.G. Surovtceva]. Moscow: Moscow St. Tech. Univ. Publ., 2000. 32 p.
7. Beknev V.S., Kuftov A.F., Tumashev R.Z. Metodicheskoe ukazanie po raschetu i proektirovaniyu tsentrobezhnykh kompressorov GTD [A guideline for the calculation and design of centrifugal compressors GTE]. Moscow: Moscow St. Tech. Univ. Publ., 1996. 41 p.
8. Mitrokhin V.T. Vybor parametrov i raschet tsentrostremitel'noy turbiny [Selection of parameters and calculation of centripetal turbine]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1974. 226 p.
9. Ivanov V.L., Leontiev A.I., Manushin E.A., Osipov M.I. Teploobmennye apparaty i sistemy okhlazhdeniya gazoturbinnnykh i kombinirovannykh ustanovok [Heat exchangers and cooling systems, gas turbine and combined plants / ed. by A.I. Leontief]. Moscow: Moscow St. Tech. Univ. Publ., 2004. 592 p.
10. Idelchik I.E. Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam / pod red. M.O. Shteynberga [Handbook of hydraulic resistance / ed. by M.O. Steinberg]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1992. 672 p.

About the authors

Arbekov Alexander Nikolaevich, Candidate of Science (Engineering), Bauman Moscow State Technical University. Area of Research: the characteristics of a small-sized stage centrifugal compressor.

Novitskiy Bronislav Bronislavovich, Bauman Moscow State Technical University. E-mail: novitskiybronislav@yandex.ru. Area of Research: the characteristics of a small-sized stage centrifugal compressor.