

РАЗРАБОТКА УТИЛИЗАЦИОННОГО ВОЗДУШНО-ТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

© 2016

- Ю. С. Елисеев** доктор технических наук, исполнительный директор, АО «Металлист-Самара», г. Самара, metallist@metallist-s.ru
- Д. Г. Федорченко** кандидат технических наук, главный конструктор, АО «Металлист-Самара», г. Самара, metallist@metallist-s.ru
- Ю. И. Цыбизов** доктор технических наук, профессор, ведущий конструктор, АО «Металлист-Самара», г. Самара, metallist@metallist-s.ru
- Д. Д. Тюлькин** инженер-конструктор АО «Металлист-Самара», г. Самара, metallist@metallist-s.ru
- А. Ю. Ткаченко** кандидат технических наук, доцент кафедры теории двигателей летательных аппаратов, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, tau@ssau.ru

Рассмотрены способы утилизации тепла выхлопных газов для повышения энергетической эффективности тепловых машин. Для создания привода генератора мощностью 150 кВт, предназначенного для выработки электроэнергии на нужды газоперекачивающей станции, выбрана концепция воздушно-турбинного двигателя. В воздушно-турбинном двигателе рабочим телом является атмосферный воздух, подогреваемый выхлопными газами газотурбинного привода газоперекачивающего агрегата. Выполнено моделирование и исследование термодинамического цикла трёх схем воздушно-турбинного двигателя: с подводом тепла к рабочему телу от продуктов сгорания газотурбинной установки в рекуперативном воздухоподогревателе; эжектированием продуктов сгорания газотурбинной установки воздухом, поступающим из компрессора воздушно-турбинного двигателя, и дальнейшей подачей смеси в турбину; комбинированная – с предварительным подогревом активного воздуха, поступающего из компрессора в эжектор. На основании результатов термогазодинамических расчётов определена рациональная конструкция воздушно-турбинного двигателя, включающая двухступенчатый осевой компрессор, рекуперативный воздухоподогреватель, эжектор и одноступенчатую осевую турбину. В эжекторе в качестве активного потока используется сжатый воздух от компрессора воздушно-турбинного двигателя, а в качестве пассивного – продукты сгорания двигателя НК-16СТ. Рекуперативный воздухоподогреватель и эжектор размещаются в выхлопном тракте газоперекачивающего агрегата. Выбранный конструктивный облик воздушно-турбинного двигателя соответствует техническим требованиям, предъявляемым предприятиями газотранспортной отрасли.

Утилизация тепла; компрессор; турбина; рекуперативный теплообменник; выхлопные газы.

Цитирование: Елисеев Ю.С., Федорченко Д.Г., Цыбизов Ю.И., Тюлькин Д.Д., Ткаченко А.Ю. Разработка утилизационного воздушно-турбинного двигателя // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15, № 4. С. 57-63. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-4-57-63

Результаты исследования проблемы энергосбережения и энергообеспечения показывают, что в настоящее время наряду с нетрадиционными источниками энергии (газоветроэнергетические, вихревые ветросолнечные установки и т.д.) большое внимание уделяется вопросам утилизации тепла выхлопных газов тепловых машин. Перечислим наиболее известные способы утилизации тепла выхлопных газов.

Парогазовый цикл, где тепло выхлопных газов газотурбинной установки (ГТУ) используется для выработки пара в котлах утилизаторах, который, в свою очередь, направляется в паровую турбину для выработки электрической энергии. Основным недостатком для использования в газоперекачивающих агрегатах (ГПА) – создание целой инфраструктуры выработки пара.

Органический цикл Ренкина, где в качестве рабочего тела используются низкокипящие органические вещества. Как правило, это циклопентан, толуол или фреон. Основные недостатки таких установок:

- рабочие тела, обеспечивающие достижение высоких КПД, являются взрывоопасными, пожароопасными, токсичными и канцерогенными;
- рабочие тела на основе фреона имеют низкий КПД и запрещены для использования.

Прямой цикл с использованием термоакустического эффекта Релея, связанный с преобразованием тепловой энергии в акустическую и электрическую. Основным недостатком – низкий КПД и малая реализуемая мощность [1].

В качестве примера реализации использования тепла выхлопных газов можно привести энергетическую утилизационную установку с пентановым циклом УТГ-4П разработки ОАО «Сумское НПО им. М.В. Фрунзе». Установка применяется как утилизационная надстройка к приводным ГТУ компрессорных станций с доработками выхлопного тракта. В конструкции использована радиальная одноступенчатая турбина ТПР-4/6-1,45/01 с частотой вращения вала редуктора 3000 об/мин. Мощность пентановой турбины – 4000 кВт. Расход паров пентана – 57,2 кг/с.

Из анализа этих способов утилизации тепла следует, что наиболее простым, дешёвым, безопасным и экологически чистым способом утилизации тепла выхлопных газов ГТУ является воздушно-турбинный двигатель (ВТД), где рабочим телом является атмосферный воздух, подогреваемый выхлопными газами.

При этом ближайшим прямым аналогом ВТД по схеме использования тепла для подогрева сжатого воздуха является турбореактивный двигатель с атомным реактором (ТРДА), в котором в отличие от традиционной схемы организации рабочего процесса в ТРД тяга двигателя создаётся не расширяющимся от сжигания керосина газом, а воздухом, нагреваемым в реакторе. Так, например, ещё в середине 50-х годов прошлого столетия в ОКБ под руководством А.М. Люльки разработана конструкция ТРДА так называемой схемы «коромысло» – с изогнутой проточной частью и выведением атомного реактора за пределы вала (рис. 1) [2].

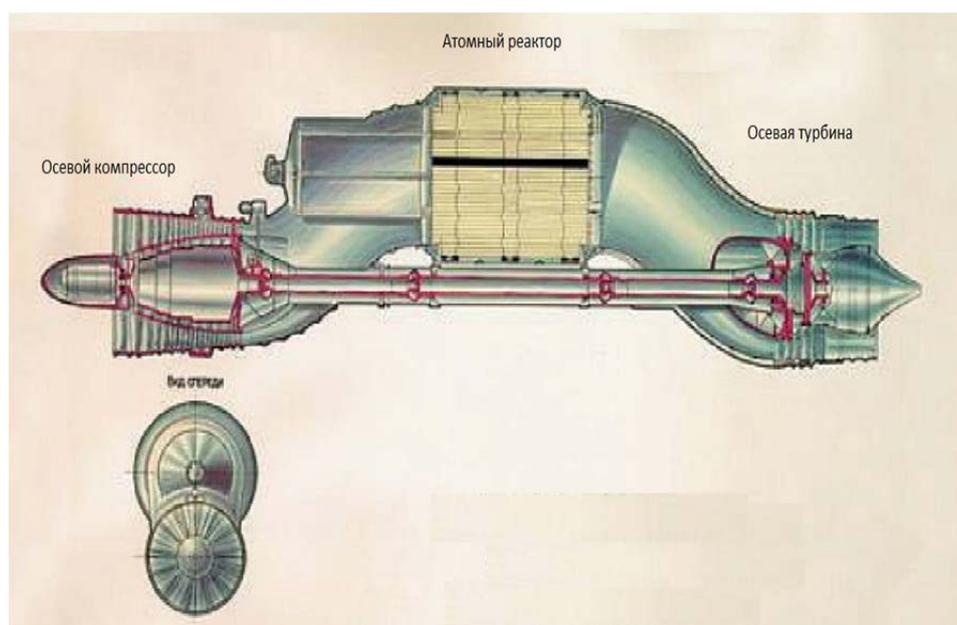


Рис.1. Турбореактивный двигатель с атомным реактором (ТРДА) по схеме «коромысло» разработки ОКБ А.М. Люльки

На предприятии АО «Металлист-Самара» по согласованию с ПАО «Газпром» и ООО «Газпром трансгаз Югорск» разработано техническое предложение на проектирование воздушно-турбинного двигателя мощностью 150 кВт (ВТД-150), предназначенного для привода электрогенератора за счёт утилизации тепла отводящих газов в газоперекачивающем агрегате от ГТУ НК-16СТ. Температура уходящих выхлопных газов на номинальном режиме работы этого ГТУ изменяется от 584 К (311 °С) при температуре окружающей среды –30 °С до 685 К (412 °С) при +15 °С, т. е. не используется довольно значительный тепловой ресурс, «выбрасываемый» в атмосферу.

Исследованы три схемы ВТД применительно к ГПА с двигателем НК-16СТ:

- с подводом тепла к рабочему телу от продуктов сгорания ГТУ в рекуперативном воздухоподогревателе (ВТДр) (рис. 2);
- с эжектированием продуктов сгорания ГТУ воздухом, поступающим из компрессора ВТД, и дальнейшей подачей смеси в турбину (ВТДэ) (рис. 3);
- комбинированная – с предварительным подогревом активного воздуха, поступающего из компрессора в эжектор (ВТДк) (рис. 4).

Параметры рабочего тела рассчитываются в сечениях:

- перед двигателем [Н];
- на входе в компрессор [В];
- на выходе из компрессора [К];
- на выходе из теплообменника [Р];
- на выходе из эжектора [Э];
- на выходе из турбины [Т];
- на выходе из сопла [С].

Схема ВТДр реализует цикл с внешним подводом теплоты. Избыточная мощность турбины используется для привода генератора электроэнергии. За счёт умеренной температуры источника тепла температура перед турбиной ВТДр T_p^* (не превышает 700 К) оптимальная степень повышения давления составила величину $\pi_k^* = 2,3$. Потребный расход воздуха, обеспечивающий выработку 150 кВт электроэнергии на расчётном режиме при $t_n = -30^\circ\text{C}$ и при степени рекуперации тепла в теплообменнике $\Theta = 0,8$, равен 8,3 кг/с.

Величина вырабатываемой мощности ВТДр зависит от температуры и давления атмосферного воздуха, температуры продуктов сгорания за свободной турбиной основной ГТУ, а также от доли мощности, отбираемой от турбокомпрессора на привод электрогенератора.

Изменение вырабатываемой электрической мощности в зависимости от частоты вращения турбокомпрессора при различных температурах атмосферного воздуха представлено на рис. 5.

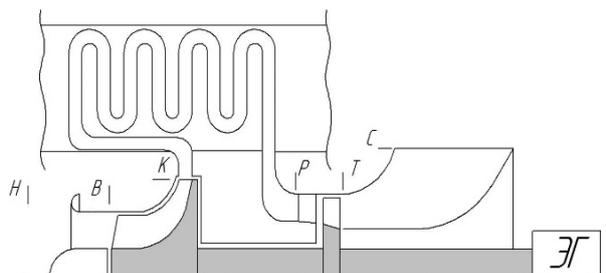


Рис. 2. Расчётная схема ВТД с рекуперативным воздухоподогревателем (ВТДр)

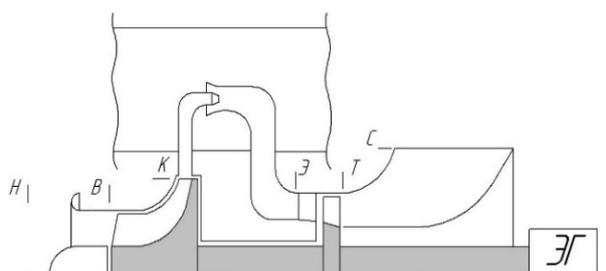


Рис. 3. Расчётная схема ВТД с эжектором (ВТДэ)

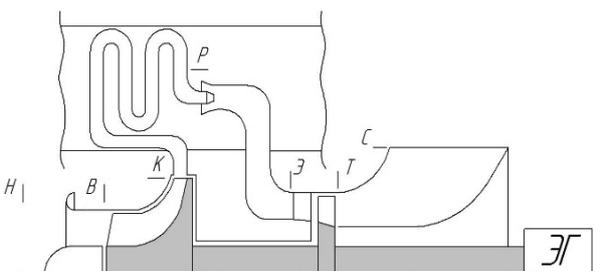


Рис. 4. Расчётная схема ВТД с рекуперативным воздухоподогревателем и эжектором (ВТДк)

Недостатком ВТДр является большая потребная площадь теплообмена и, следовательно, габариты рекуперативного воздухоподогревателя.

Схема ВТД с эжектированием потока обладает более простой конструкцией по сравнению с ВТДр. Однако результаты расчётных исследований показали наличие ограничения области возможного применения данной схемы для преобразования тепла выхлопных газов в электроэнергию. Несмотря на то, что смесь воздуха и продуктов сгорания, поступающие из эжектора в турбину, обладает более высокими значениями расхода и внутренней энергии по сравнению с воздухом, выходящим из компрессора, её давление получается существенно ниже. При низких значениях температуры выхлопных газов ГТУ это оказывает преобладающее влияние на величину вырабатываемой мощности.

Снизить габариты рекуперативного воздухоподогревателя и одновременно обеспечить достаточную величину избыточной мощности на валу турбокомпрессора можно за счёт комбинирования первой и второй схем ВТД (рис. 4). Подогрев воздуха, поступающего из компрессора ВТДк, перед подачей в эжектор обеспечивает увеличение его динамического импульса. Поэтому становится возможным увеличение полного давления рабочего тела, выходящего из эжектора, перепада давления на турбине и её мощности до требуемого уровня.

Результаты проектного расчёта ВТДк при $t_n = +15^\circ\text{C}$ и расчёта его климатических характеристик представлены в табл. 1.

Определён наиболее приемлемый вариант конструкции ВТД с рекуперативным воздухоподогревателем и эжектором (вариант 3), у которого поверхность теплообмена в РВП снижается более чем на 30%.

Для реализации принята конструкция ВТД с двухступенчатым осевым компрессором ($\pi_k^* = 1,35$), подогревом сжатого воздуха в рекуперативном воздухоподогревателе (РВП, степень рекуперации 0,45), эжекторным смесителем и одноступенчатой осевой турбиной ($\pi_k^* = 1,13$). Частота вращения ротора 6000 об/мин.

Отметим преимущества ВТД эжекторной схемы:

1. Использование осевого компрессора (осевой вход).
2. Низкий уровень давлений в газоздушном тракте двигателя.
3. Существенное уменьшение габаритов рекуперативного воздухоподогревателя.
4. Достижимый на практике уровень КПД.

Выполнен тепловой расчёт РВП, газодинамический расчёт эжектора и определены основные конструктивные размеры компрессора, турбины, РВП и эжектора. По результатам газодинамического расчёта определены основные геометрические размеры компрессора, турбины и газоздушного тракта, представленные в табл. 2, 3. На рис. 6, 7 представлен конструктивный облик этих элементов ВТД.

На рис. 8, 9 представлены компоновка ВТД-150 и общая компоновка ГТУ НК-16СТ с выхлопной шахтой и воздушно-турбинным двигателем [3]. Принятая для разработки конструкция ВТД отвечает согласованным техническим требованиям.

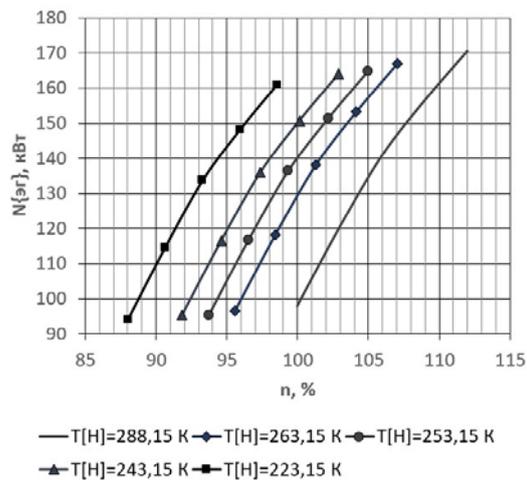


Рис. 5. Климатические характеристики ВТДр

Таблица 1. Результаты проектного расчёта и расчёта климатических характеристик ВТДк

Параметр	Значения			
	$T^*[H], K$	288	273	263
$p^*[H], кПа$	101,3	101,3	101,3	101,3
$G[B], кг/с$	10,9	11,4	11,8	12,6
$\Pi^*\{к\}$	1,35	1,37	1,38	1,41
$\eta^*\{к\}$	0,83	0,83	0,83	0,83
$L\{к\}, кДж/кг$	31,22	30,89	30,92	30,47
$N\{к\}, кВт$	339,2	351,8	364,6	383,0
$n, \%$	100	100	100	100
$T^*[K], K$	319	304	294	274
$p^*[K], кПа$	136,8	138,5	140,1	143,0
$\sigma\{го\}$	0,97	0,97	0,97	0,97
$\theta\{рег\}$	0,45	0,45	0,45	0,45
$T^*\{газ\}, K$	685	651,4	629	584
$T^*[P], K$	484	460	445	413
$p^*[P], кПа$	132,7	134,4	135,9	138,7
$T^*[Э], K$	602	573	553	514
$p^*[Э], кПа$	114,6	115,1	115,5	116,2
$G[Э], кг/с$	26,1	27,4	28,4	30,5
$\Pi^*\{T\}$	1,13	1,135	1,14	1,146
$\eta^*\{T\}$	0,92	0,92	0,92	0,92
$L\{T\}, кДж/кг$	19,13	18,78	18,65	18,11
$N\{T\}, кВт$	498,8	514,4	530,5	553,2
$N\{эг\}, кВт$	150	152,8	155,8	159,8

Таблица 2. Двухступенчатый осевой компрессор

№	Наименование размера	Первое рабочее колесо	Первый направляющий аппарат	Второе рабочее колесо	Второй направляющий аппарат
1	Наружный диаметр, D_n [мм]	544,68	545	544,86	545
2	Средний диаметр, $D_{ср}$ [мм]	498,36	509,8	511,4	512,8
3	Внутренний диаметр, $D_{вн}$ [мм]	452,04	474,6	476,94	481,3
4	Высота лопатки, H [мм]	46,31	35,21	34,45	31,51
5	Количество лопаток	37	43	41	47

Таблица 3. Осевая турбина

№	Наименование размера	Сопловой аппарат	Рабочее колесо
1	Наружный диаметр, D_n [мм]	760,88	760,88
2	Средний диаметр, $D_{ср}$ [мм]	650	629,62
3	Внутренний диаметр, $D_{вн}$ [мм]	539,12	498,36
4	Высота лопатки, H_n [мм]	110,89	131,26
5	Количество лопаток	43	49

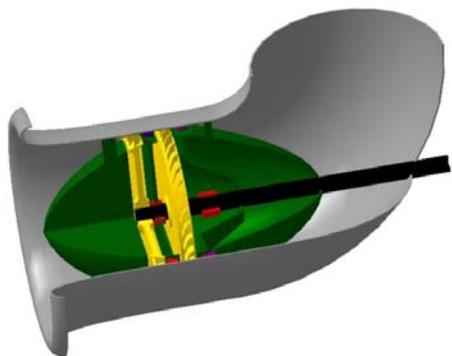


Рис. 6. Общий вид компрессора

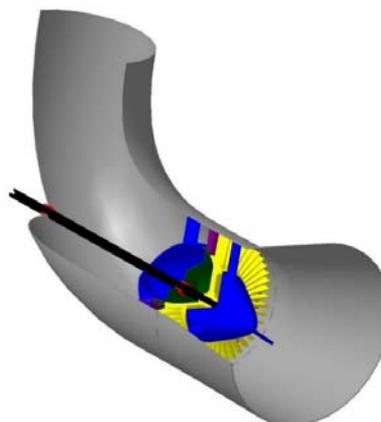


Рис. 7. Общий вид турбины

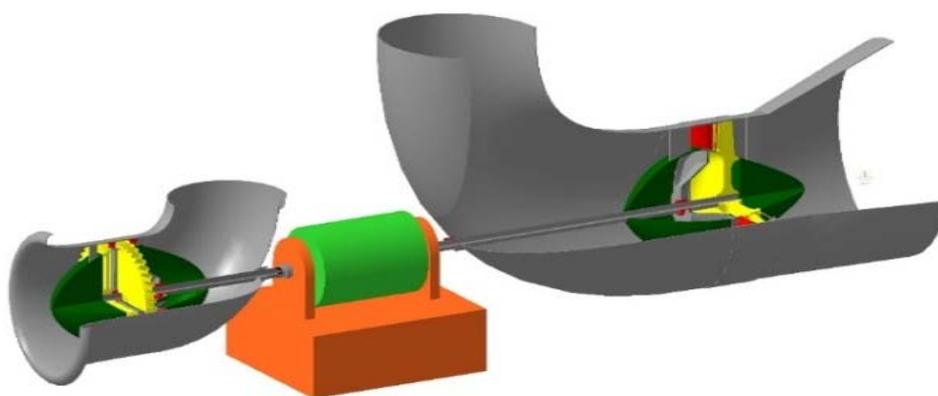


Рис. 8. Компоновка ВТД-150 в выхлопном устройстве ГПА двигателя НК-16СТ

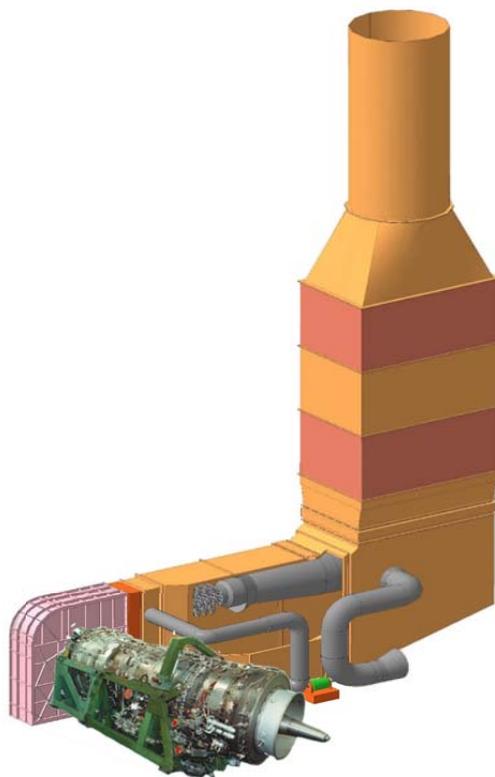


Рис. 9. Компоновка ГТУ НК-16СТ с выхлопной шахтой и ВТД

Библиографический список

1. Зиновьев Е.А., Довгялло А.И., Воротников Г.В. Гармоническая модель термодинамического цикла, реализуемого в регенераторе термоакустического двигателя // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2011. № 3 (27), ч. 4. С. 11-15.
2. Грек А. Верхом на реакторе // Популярная механика. 2003. № 7. С. 24-29.
3. Гриценко Е.А., Данильченко В.П., Лукачев С.В., Реник В.Е., Цыбизов Ю.И. Конвертирование авиационных ГТД в газотурбинные установки наземного применения. Самара: Самарский научный центр РАН, 2004. 266 с.

DEVELOPMENT OF AN EXHAUST AIR TURBINE ENGINE

© 2016

- Yu. S. Yeliseev** Doctor of Science (Engineering), Chief Executive Officer, «Metallist-Samara» company, metallist@metallist-s.ru
- D. G. Fedorchenco** Candidate of Science (Engineering), Chief Designer, «Metallist-Samara» company, metallist@metallist-s.ru
- Yu. I. Tsibizov** Doctor of Science (Engineering), design project leader, «Metallist-Samara» company, metallist@metallist-s.ru
- D. D. Tyulkin** design engineer, «Metallist-Samara» company, metallist@metallist-s.ru
- A. Yu. Tkachenko** Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of the Department of Aircraft Engine Theory, Samara National Research University, Samara, Russian Federation, tau@ssau.ru

The article discusses ways of utilizing exhaust gas heat to improve the power efficiency of heat engines. The concept of an air turbine engine is chosen to make a generator drive with the capacity of 150 kW intended to produce energy for a gas-pumping unit. In an air turbine engine atmospheric air heated by the exhaust gases of the gas turbine drive of a gas pumping unit serves as the working fluid. Three thermodynamic cycle schematics for an air turbine engine (ATE) are analyzed. The optimal design of an ATE comprising a two-stage axial compressor, a recuperative air heater (RAH), an ejector and a single-stage axial turbine is determined on the basis of thermodynamic calculations. Compressed air from the ATE compressor unit is used in the ejector as the active flow, while the combustion products of the NK-16ST engine are used as the passive flow. The recuperative air heater and ejector are located in the exhaust line of the gas pumping unit. The chosen design concept of the air turbine engine corresponds to the technical requirements of gas transmission enterprises.

Heat utilization; compressor; turbine; recuperative heat exchanger; exhaust gases.

Citation: Yeliseev Yu.S., Fedorchenco D.G., Tsibizov Yu.I., Tyulkin D.D., Tkachenko A.Yu. Development of an exhaust air turbine engine. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2016. V. 15, no. 4. P. 57-63. DOI: 10.18287/2541-7533-2016-15-4-57-63

References

1. Zinovev E.A., Dovgjallo A.I., Vorotnikov G.V. Harmonic model of thermodynamic cycle in thermoacoustic engine regenerator. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2011. No 3 (27), part 4. P. 11-15. (In Russ.)
2. Grek A. Riding a reactor. *Populyarnaya mekhanika*. 2003. No. 7. P. 24-29. (In Russ.)
3. Gritsenko E.A., Danil'chenko V.P., Lukachev S.V., Renik V.E., Tsybizov Yu.I. *Konvertirovanie aviatsionnykh GTD v gazoturbinnye ustanovki nazemnogo primeneniya* [Conversion of aircraft gas turbine engines into ground-application gas turbine units]. Samara: Samarskiy Nauchnyy Tsentr RAN Publ., 2004. 266 p.