

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ,
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И
ХИМИЧЕСКОЕ
МАШИНОСТРОЕНИЕ**

УДК 621.438

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ КОНВЕРТИРОВАННЫХ
АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ТИПА НК-16СТ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБРАЩЕННОГО ГАЗОГЕНЕРАТОРА**

А.М. Гафуров¹, Б.М. Осипов¹, Р.З. Гатина², Н.М. Гафуров²

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²Казанский национальный исследовательский технологический университет,
г. Казань, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3470-4933>, progress150987@rambler.ru

Резюме: В статье рассматриваются возможности создания эффективных энергетических систем на базе конвертированных авиационных газотурбинных двигателей типа НК-16СТ. Представлены результаты исследования эффективности газотурбинного двигателя типа НК-16СТ с использованием обращенного газогенератора, охлаждаемого низкокипящим рабочим контуром.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, обращенный газогенератор, технологии бинарного цикла, низкокипящее рабочее тело.

**INCREASE OF ENERGY EFFICIENCY OF THE CONVERTED AIRCRAFT
GAS TURBINE ENGINES SUCH AS NK-16ST WITH USE OF THE TURNED GAS
GENERATOR**

A.M. Gafurov¹, B.M. Osipov¹, R.Z. Gatina², N.M. Gafurov²

¹Kazan state power engineering university, Kazan, Russia

²Kazan national research technological university, Kazan, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3470-4933>, progress150987@rambler.ru

Abstract: In article the possibilities of creation of effective power generating systems on the basis of the converted aircraft gas turbine engines such as NK-16ST are considered. Results of research of efficiency of the gas turbine engine such as NK-16ST with use of the turned gas generator cooled by the low-boiling working contour are provided.

Keywords: gas turbine engine, turned gas generator, technologies of a binary cycle, the low-boiling working medium.

Начиная с семидесятых годов прошлого века в энергетике, в нефтяной и газовой промышленности значительную роль начинают играть газотурбинные двигатели (ГТД), создаваемые на базе авиационных ГТД путем их конвертирования (от английского слова «conversion» – превращение, изменение, перестройка, переоборудование). Энергетические установки, построенные на базе авиационных ГТД, находят широкое применение в различных областях народного хозяйства в качестве: энергоприводов; приводов газоперекачивающих агрегатов; струйных и струйно-тепловых машин; тепловых машин, применяемых для обогрева и сушки различных объектов; парогазогенераторов в пожаротушении и т.д. [1].

На базе авиационных двигателей чрезвычайно выгодно создавать и электростанции городского типа. Отчуждаемая под станцию площадь несопоставимо меньше, чем для строительства тепловых электростанций, при одновременно лучших экологических характеристиках.

Показатели тепловой экономичности конвертированных авиационных ГТД можно считать удовлетворительными: при использовании двигателей ранних поколений (НК-12СТ, НК-16-18СТ) КПД по выработке электроэнергии составляет около 30% и с более поздними ГТД (НК-36СТ, НК-37, НК-38СТ, АЛ-31СТ) – 35-38% [2].

С момента выпуска первых двигателей НК-16СТ и НК 16-18СТ зарекомендовали себя надежными и простыми в эксплуатации и обслуживании. С начала серийного производства ОАО «КМПО» было выпущено более 1000 приводов НК-16СТ, которые успешно эксплуатируются в различных газотранспортных предприятиях ОАО «Газпром». Суммарная наработка составляет более 50 млн. часов.

Двигатель НК-16СТ конструкции ОКБ Кузнецова создан на базе авиационного двухконтурного двигателя НК-8-2У семейства двигателей НК. Базовый двигатель применяется в качестве силовой установки самолета Ту-154.

Двигатель НК-16СТ предназначен для работы в составе газоперекачивающего агрегата ГПА-Ц-16/76, разработанного Сумским машиностроительным научно-производственным объединением (СМНПО) им. Фрунзе по заказу Министерства газовой промышленности. Двигатель создавался в течение 1979–1982 гг. Конструктивно двигатель состоит из 2-х модулей: газогенератора (ГГ) (собственно базового двигателя с доработками) и силовой турбины (СТ). Каждый модуль имеет свою раму для крепления, что позволяет при необходимости заменять двигатель целиком или помодульно ГГ и СТ [3].

Принципиальная схема ГТД типа НК-16СТ показана на рис. 1.

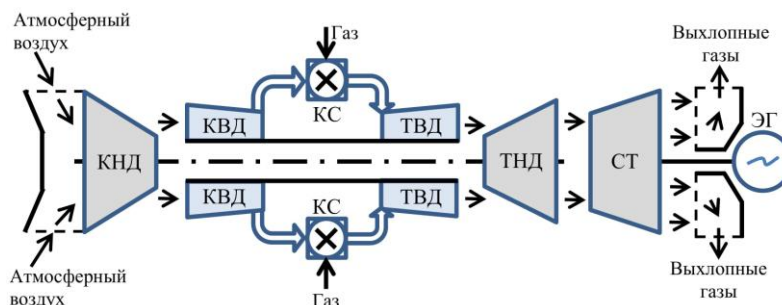


Рис. 1. Принципиальная схема газотурбинного двигателя типа НК-16СТ: КВД, КНД – компрессор высокого и низкого давления; КС – камера сгорания; ТВД, ТНД – турбина высокого и низкого давления; СТ – силовая турбина; ЭГ – электрогенератор

С помощью автоматизированной системы газодинамических расчетов энергетических турбомашин (АС ГРЭТ) была составлена математическая модель (ММ)

двигателя типа НК-16СТ и проведены расчеты [4]. Правообладателем программного комплекса «АС ГРЭТ» является Казанский государственный энергетический университет [5].

Основные результаты расчета ММ двигателя типа НК-16СТ представлены в табл. 1 для температуры и давления окружающего воздуха, равных, соответственно, 288 К и 0,101326 МПа, и с учетом реальных гидравлических потерь на входе и выходе из двигателя.

Таблица 1

Результаты расчета ММ ГТД типа НК-16СТ	
Показатель параметра, размерность	Значение
Расход воздуха через компрессор, кг/с	99,98
Степень сжатия в КНД	2,45
Степень сжатия в КВД	3,72
Расход топливного газа, кг/с	1,3441
Температура в камере сгорания, К	1086
Расход продуктов сгорания на выхлопе, кг/с	100,67
Температура газа на срезе выхлопного патрубка, К	663,33
Мощность, кВт	16000,458
Эффективный КПД, %	27,723

Для повышения эффективности ГТД типа НК-16СТ был использован усложненный цикл Брайтона по важнейшим удельным показателям: топливной экономичности и удельной мощности. Реализация этих свойств связана с добавлением нового узла – обращенного газогенератора (ОГГ), обеспечивающего эффект понижения давления ниже окружающей среды за силовой турбиной практически любого газотурбинного двигателя, что увеличивает срабатывание теплоперепада на силовой турбине и предопределяет его автономное использование не только в ГТД, а также в ряде других высокотемпературных энергетических схем [6].

ОГГ состоит последовательно из турбины перерасширения, теплообменника-охладителя и дожимающего компрессора (рис. 2).

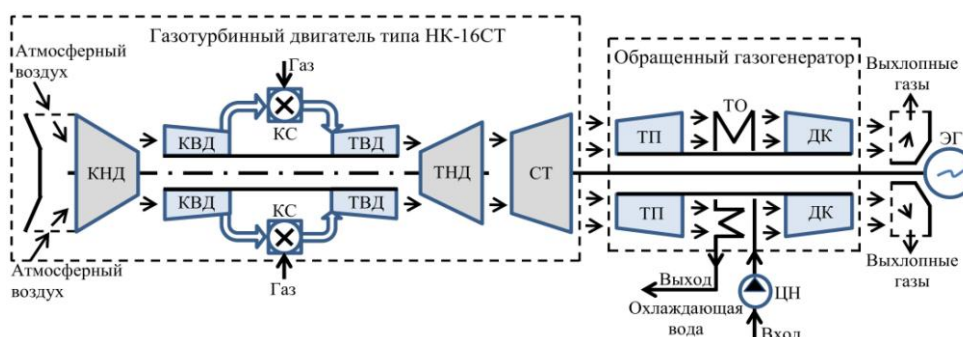


Рис. 2. Принципиальная схема газотурбинного двигателя типа НК-16СТ с использованием ОГГ, охлаждаемого водой: ТП – турбина перерасширения; ДК – дожимной компрессор; ТО – теплообменник-охладитель; ЦН – циркуляционный насос

В существующем газоходе за силовой турбиной основного двигателя типа НК-16СТ установлен ОГГ (рис. 2), в котором происходит дополнительное расширение продуктов сгорания на рабочих лопатках ТП до давления ниже атмосферного (около 0,05 МПа). Далее происходит охлаждение продуктов сгорания в ТО с использованием охлаждающей воды. Затем продукты сгорания поступают в ДК, где происходит их

дальнейшее сжатие до давления выше атмосферного.

Основные результаты расчета математической модели двигателя типа НК-16СТ с ОГГ, охлаждаемого водными ресурсами при стандартных атмосферных условиях и реальных гидравлических потерях на входе и выходе в ГТД, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета ММ ГТД типа НК-16СТ с ОГГ, охлаждаемого водными ресурсами

Показатель параметра, размерность	Значение
Расход воздуха через компрессор, кг/с	95,34
Расход топливного газа, кг/с	1,0878
Температура в камере сгорания, К	1100
Давление газа за силовой турбиной, МПа	0,0961
Температура газа за турбиной перерасширения, К	566,36
Давление газа за турбиной перерасширения, МПа	0,053
Температура газа на входе в дожимающий компрессор, К	383
Давление газа на входе в дожимающий компрессор, МПа	0,0508
Температура охлаждающей воды на входе в ТО, К	333,15
Температура охлаждающей воды на выходе из ТО, К	363,15
Расход охлаждающей воды, кг/с	158,11
Мощность циркуляционного насоса охлаждающей воды, кВт	37,2024
Расход продуктов сгорания на выхлопе, кг/с	91,99
Температура газа на срезе выхлопного патрубка, К	475,62
Мощность, кВт	16000
Эффективный КПД, %	30

Для повышения тепловой экономичности и создания эффективных энергетических систем на базе рассматриваемой ГТД типа НК-16СТ с ОГГ предлагается схема реализации бинарной энергоустановки на низкокипящем рабочем теле – жидком метаноле CH_3OH (рис. 3).

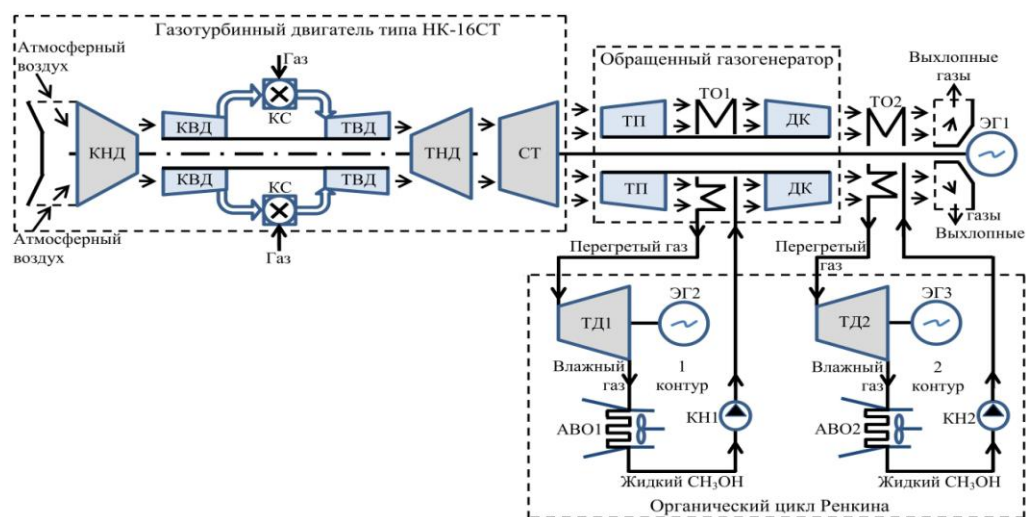


Рис. 3. Принципиальная схема газотурбинного двигателя типа НК-16СТ с использованием ОГГ, охлаждаемого жидким метанолом CH_3OH : ТО1, ТО2 – теплообменник-охладитель первого и второго контура; ТД1, ТД2 – турбодетандер; АВО1, АВО2 – аппарат воздушного охлаждения; КН1, КН2 – конденсатный насос; ЭГ1, ЭГ2, ЭГ3 – электрогенератор

Бинарный термодинамический цикл – совокупность двух термодинамических циклов, осуществляемых двумя рабочими телами так, что теплота, отводимая в одном цикле, используется в другом цикле [7].

Бинарная энергоустановка работает следующим образом (рис. 3). Высокотемпературные продукты сгорания (566,36 К) после ТП подаются в теплообменник-охладитель первого контура (ТО1), где они охлаждаются жидким метанолом, который циркулирует в первом контуре теплового двигателя, до температуры выше температуры конденсации водяных паров (383 К). Затем продукты сгорания направляют в ДК, там происходит их сжатие до давления выше атмосферного с повышением температуры (475,62 К). На выходе из ОГГ продукты сгорания поступают в теплообменник-охладитель второго контура (ТО2), где происходит их охлаждение до требуемой температуры с использованием жидкого метанола второго контура циркуляции. Жидкий метанол CH_3OH первого и второго контура сжимают в конденсатном насосе КН1 (КН2) до высокого давления и направляют в ТО1 (ТО2) для охлаждения продуктов сгорания ГТД. В процессе охлаждения продуктов сгорания ГТД теплота отводится на нагрев и испарение жидкого метанола CH_3OH до температуры перегретого газа. Далее перегретый газ CH_3OH расширяется в турбодетандере ТД1 (ТД2), который соединен с электрогенератором. На выходе из турбодетандера отработавший в турбине газ направляют в конденсатор воздушного охлаждения АВО1 (АВО2), где, в процессе охлаждения газа CH_3OH ниже его температуры насыщения, происходит интенсивное сжижение (конденсация), после чего конденсат (жидкость) направляют в КН1 (КН2), и цикл повторяется.

В качестве теплоносителя и низкокипящего рабочего тела выбран метанол CH_3OH , который не используется в традиционных паровых энергоустановках. Сравним основные термодинамические и теплофизические свойства (табл. 3) предлагаемого низкокипящего рабочего тела CH_3OH с традиционным водяным паром H_2O .

Таблица 3

Термодинамические и теплофизические показатели для метанола и водяного пара

Показатель параметра, размерность	CH_3OH	H_2O	Преимущества
Критическая температура, К	512,6	647,1	CH_3OH
Критическое давление, МПа	8,103	22,064	CH_3OH
Критическая плотность, кг/м^3	275,56	322	H_2O
Температура тройной точки, К	175,61	273,16	CH_3OH
Температура кипения при давлении 0,1 МПа, К	337,63	373,12	CH_3OH
Кинематическая вязкость жидкой фазы при давлении 0,1 МПа, $\text{см}^2/\text{с}$	0,0043	0,003	H_2O
Кинематическая вязкость газообразной фазы при давлении 0,1 МПа, $\text{см}^2/\text{с}$	0,088	0,2	CH_3OH
Теплопроводность жидкой фазы при 0,1 МПа, $\text{Вт/м}\cdot\text{К}$	0,19	0,68	H_2O
Теплопроводность газообразной фазы при 0,1 МПа, $\text{Вт/м}\cdot\text{К}$	0,02	0,025	H_2O
Удельная теплота парообразования, кДж/кг	1100	2256,5	CH_3OH
Изобарная теплоемкость жидкой фазы, $\text{кДж/кг}\cdot\text{К}$	2,82	4,21	H_2O
Изобарная теплоемкость газообразной фазы, $\text{кДж/кг}\cdot\text{К}$	4,43	2,08	CH_3OH

Из табл. 3 видно, что традиционный теплоноситель H_2O характеризуется более высокой теплопроводностью и теплоемкостью жидкой фазы, имеет низкую кинематическую вязкость жидкой фазы. При этом преимущество использования метанола CH_3OH в качестве рабочего тела и охлаждающей жидкости характеризуется высокой теплоемкостью и плотностью газообразной фазы, низкой температурой кипения, замерзания и теплотой парообразования, что позволяет проводить термодинамические процессы при более низких температурах.

Применение метанола в качестве рабочего тела позволяет создать компактную малогабаритную турбину, так как объемный расход газа (пара) через последнюю ступень в случае применения метанола значительно уменьшается. Так, при температуре конденсации 338,69 К удельный объем водяного пара составляет 6,05 м³/кг при давлении 0,0256 МПа, в то время как у метанола – 0,787 м³/кг при давлении 0,1056 МПа. В результате в низкокипящем рабочем контуре отсутствует вакуумная система удаления воздуха из конденсатора АВО со всеми ее эксплуатационными проблемами. Это позволяет создавать конструкции минимальных габаритов из обычных материалов (низкий уровень температур, минимальные окружные скорости и напряжения). В качестве расширительных машин и приводов электрогенераторов в органическом цикле Ренкина малой мощности могут быть использованы радиально-осевые центробежные турбины, которые нашли широкое применение в областях криогенной техники (турбодетандеры в ожижителях природного газа) [8, 9].

Основные результаты расчета математической модели двигателя типа НК-16СТ с ОГГ, охлаждаемого жидким метанолом СН₃ОН, представлены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты расчета ММ ГТД типа НК-16СТ с ОГГ, охлаждаемого жидким метанолом СН₃ОН при стандартных атмосферных условиях

Показатель параметра, размерность	Значение	
Газотурбинный двигатель		
	ГТД	
Расход воздуха в компрессор, кг/с	95,34	
Температура в камере сгорания, К	1100	
Расход топливного газа, кг/с	1,0878	
Температура газа за турбиной перерасширения, К	566,36	
Давление газа за турбиной перерасширения, МПа	0,053	
Температура газа на входе в дожимающий компрессор, К	383	
Давление газа на входе в дожимающий компрессор, МПа	0,0508	
Температура газа на выходе из дожимающего компрессора, К	475,62	
Температура выхлопных газов, К	378,15	
Расход продуктов сгорания на выхлопе, кг/с	91,99	
Мощность, кВт	16000	
Эффективный КПД, %	30	
Теплообменник-охладитель первого и второго контура		
	ТО1	ТО2
Температура метанола, К	вход	339,4
	выход	337,68
Давление метанола, МПа	вход	543,15
	выход	453,15
Расход метанола, кг/с	вход	8,41
	выход	2,42
Теплопроизводительность, кВт	7,9	2,27
	13,5	7,64
	17216	9056
Турбодетандер		
	ТД1	ТД2
Температура метанола, К	вход	543,15
	выход	453,15
Давление метанола, МПа	вход	338,69
	выход	338,69
Расчетный изоэнтروпийный КПД	вход	7,9
	выход	2,27
Вырабатываемая мощность, кВт	0,1056	0,1056
	0,87	0,87
	4208,6	1651
Аппарат воздушного охлаждения		
	АВО1	АВО2
Температура охлаждаемого метанола, К	вход	338,69
	выход	337

Давление охлаждаемого метанола, кПа	вход	105,6	105,6
	выход	101,37	101,37
Температура охлаждающего воздуха, К	вход	298,15	298,15
	выход	318,15	318,15
Расчетная поверхность теплообмена, м ²		7875	4456
Объемный секундный расход охлаждающего воздуха, м ³ /с		551	312
Потребляемая мощность на электродвигатель вентилятора, кВт		130	74
Конденсатный насос		КН1	КН2
Давление метанола, кПа	вход	101,37	101,37
	выход	8410	2420
Температура метанола, К	вход	337	337
	выход	339,4	337,68
Расход метанола, кг/с		13,5	7,64
Потребляемая мощность, кВт		180	29
Основные показатели			
Теплота, подведенная с топливом в камере сгорания ГТД, кВт		52790,1	
Суммарная полезная электрическая мощность комбинированной установки с учетом затрат на КН1 (КН2) и АВО1 (АВО2), кВт		21109	
Эффективный КПД комбинированной установки, %		40	
Удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии в комбинированной установке, кг/кВт.ч		0,307	

Аппараты воздушного охлаждения наиболее эффективны в тех случаях, когда они предназначены для снижения температуры до 333 К и давления до 6,4 МПа. АВО имеют более длительный срок службы, по сравнению с аппаратами водяного охлаждения, из-за меньшего загрязнения и коррозии наружной поверхности теплообмена [10].

Выводы

1. По результатам расчета математической модели видно, что использование газотурбинного двигателя типа НК-16СТ с ОГТ, охлаждаемого жидким метанолом CH_3OH , приводит к увеличению выработки электроэнергии на 5,685 МВт – до уровня 21,109 МВт с общей эффективностью 40% без использования дополнительного топлива и без увеличения эмиссии вредных веществ. Следует отметить, что использование более высокотемпературных газотурбинных двигателей типа АЛ-31СТН (ОАО УМПО) или НК-38СТ (ОАО КМПО) может привести к увеличению эффективного КПД комбинированной установки до 50%.

2. Эффективность перехода на низкикипящие рабочие тела обеспечивает целый ряд преимуществ: а) отсутствие вакуума в установке; б) меньшие габариты и более высокие значения КПД турбомашин; в) возможность использования прямоточного теплообменника-охладителя, упрощающего энергетическую установку; г) отсутствие коррозии элементов установки и эрозии лопаток турбины.

Литература

1. Peter Jansohn. Modern Gas Turbine Systems: High Efficiency, Low Emission, Fuel Flexible Power Generation. Woodhead Publishing Series in Energy. Elsevier, 2013. 837 pages.

2. Иноземцев А.А., Нихамкин М.А. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. Общие сведения. Основные параметры и требования. Конструктивные и силовые схемы. М.: Машиностроение, 2008. 208 с.

3. РТЭ ГТД НК-16СТ. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.turbinst.ru/6830-rte-gtd-nk-16st.html>.

4. Гафуров А.М., Осипов Б.М., Титов А.В., Гафуров Н.М. Программная среда для проведения энергоаудита газотурбинных установок. // Энергетика Татарстана. 2015. № 3 (39). С. 20–25.
5. Титов А.В., Осипов Б.М. Автоматизированная система газодинамического расчета энергетических турбомашин редакция 014. / Программа для ЭВМ № 2015613993 РФ, 20.04.2015 г.
6. Перельштейн Б.Х. Новые энергетические системы: Монография. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2008. 244 с.
7. Николаев Г.П., Лойко А.Э. Техническая термодинамика. / Учебное издание. Екатеринбург, УрФУ, 2013. 227 с.
8. Гафуров А.М. Потенциал для преобразования низкопотенциальной тепловой энергии в работу теплового двигателя. // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2014. №3 (23). С. 19–24.
9. Чумаков Ю.А. Теория и расчет транспортных газотурбинных двигателей. / Учебник. Изд-во Инфра-М, 2012. 448 с.
10. Ananthanarayanan. P.N. Basic Refrigeration and Air Conditioning. Fourth edition. Tata McGraw-Hill Education, 2013. 738 pages.

Авторы публикации

Гафуров Айрат Маратович – инженер I категории отдела «Управление научно-исследовательской работы» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: progress150987@rambler.ru.

Осипов Борис Михайлович – к.т.н., профессор кафедры «Энергетическое машиностроение» (ЭМ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: obm0099@yandex.ru.

Гатина Резеда Зуфаровна – студентка 4 курса кафедры «Химия и технология высокомолекулярных соединений» Казанского национального исследовательского технологического университета (КНИТУ).

Гафуров Наиль Маратович – студент 4 курса кафедры «Химия и технология высокомолекулярных соединений» Казанского национального исследовательского технологического университета (КНИТУ). E-mail: hankmpro@mail.ru.

References

1. Peter Jansohn. Modern Gas Turbine Systems: High Efficiency, Low Emission, Fuel Flexible Power Generation. Woodhead Publishing Series in Energy. Elsevier, 2013. 837 pages.
2. Inozemtsev A.A., Nikhamkin M.A. Bases of designing of aviation engines and power installations. General information. Key parameters and requirements. Constructive and power schemes. M.: Mechanical engineering, 2008. 208 pages.
3. RTE GTD NK-16ST. [Electronic resource] / Access mode: <http://www.turbunist.ru/6830-rte-gtd-nk-16st.html>.
4. Gafurov A.M., Osipov B.M., Titov A.V., Gafurov N.M. Program environment for carrying out an energy audit of gas turbine units. // Power industry of Tatarstan. 2015. No. 3 (39). pp 20-25.
5. Titov A.V., Osipov B.M. The automated system of gasdynamic calculation of power turbomachines edition 014. Computer program No. 2015613993 of the Russian Federation, 20.04.2015.
6. Perelstein B.H. New power generating systems: Monograph. Kazan: Publishing house Kazan. state. tekhn. un-sity, 2008. 244 pages.
7. Nikolaev G.P., Loyko A.E. Engineering thermodynamics. Educational edition. - Yekaterinburg, URFA, 2013. 227 pages.
8. Gafurov A.M. Potential for transformation of low-potential heat energy to operation of the heat engine. // Bulletin of the Kazan state power university. 2014. No. 3 (23). pp 19-24.

© *А.М. Гафуров, Б.М. Осипов, Р.З. Гатина, Н.М. Гафуров*

9. Chumakov Yu.A. Theory and calculation of transport gas-turbine engines. Textbook. Infra-M publishing house, 2012. 448 pages.

10. Ananthanarayanan. P.N. Basic Refrigeration and Air Conditioning. Fourth edition. Tata McGraw-Hill Education, 2013. 738 pages.

Authors of the publication

Airat M. Gafurov – engineer of the I category of department «Management of research work» Kazan state power engineering university (KSPEU). E-mail: progress150987@rambler.ru.

Boris M. Osipov – cand. tech. sci., professor department «Power engineering» Kazan state power engineering university (KSPEU). E-mail: obm0099@yandex.ru.

Reseda Z. Gatina – 4th year student, department «Chemistry and Technology of Macromolecular Compounds» Kazan National Research Technological University (KNRTU).

Nail M. Gafurov – 4th year student, department «Chemistry and Technology of Macromolecular Compounds» Kazan National Research Technological University (KNRTU). E-mail: hankmpro@mail.ru.

Поступила в редакцию

22 марта 2017 г.