

УДК 621.311.238

А.К. Махнутин, Б.В. КавалеровПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия**О ВОПРОСАХ ПРИМЕНЕНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК
И ПАРОГАЗОВЫХ УСТАНОВОК В ЭНЕРГЕТИКЕ**

В статье обсуждаются особенности и перспективы применения газотурбинных установок при производстве электрической и тепловой энергии. Представлены результаты открытых источников. Обсуждаются возможные объекты внедрения газотурбинных установок. Отмечаются определенные проблемы при конвертировании авиационных газотурбинных установок в наземные электростанции. Вначале рассмотрены особенности газотурбинной и парогазовой технологий. Вслед за этим рассмотрена общая ситуация с производством газотурбинных установок, в том числе в ретроспективном разрезе (обзор начинается с 1999 г.). Затем достаточно подробно рассмотрены объекты внедрения газотурбинных установок в электроэнергетике. Что касается электротехнических решений по сооружаемым электростанциям, то главной проблемой является определение места подключения генераторов в существующую схему электроснабжения предприятия с наименьшими затратами на ее реконструкцию. Отмечено, что использование газотурбинных установок экономически оправданно при подборе установки под покрытие тепловой нагрузки на горячее водоснабжение. Тем самым обеспечивается 100%-ная загрузка газотурбинных установок, а котельные, работающие в отопительный сезон, в летнее время отключаются. Учет специфики газотурбинных установок требуется при намечаемом в дальнейшем математическом моделировании процессов в газотурбинных электростанциях с целью совершенствования технологического процесса производства электроэнергии, достижения оптимальных показателей в установившихся и переходных режимах с учетом специфики подключения электростанции к конкретной конфигурации системы электроснабжения. Опубликованные в статье результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 13.832.2014/К «Разработка методологических основ адаптивного управления автономными и неавтономными газотурбинными электростанциями мощностью до 25 МВт».

Ключевые слова: газотурбинная установка, газотурбинная электростанция, парогазовая установка.

A.K. Makhnutin, B.V. Kavalero

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**ON THE APPLICATION OF GAS TURBINES AND COMBINED
CYCLE POWER PLANTS IN THE ENERGY SECTOR**

The article discusses the characteristics and prospects of gas-turbine plants in the production of electricity and heat. The paper was based on the results of public sources. The possible implementation of the objects of gas-turbine plants. There have been some problems when converting aircraft gas turbine power plants in the ground. First, the features of a gas turbine and combined

cycle technologies. Following this, we consider the general situation with the production of gas turbines, including in the retrospective section (review starts with 1999). Then the objects are considered in sufficient detail the implementation of gas turbines for power generation. As for the electrical solutions for the power plants were constructed, the main problem is to determine where to connect generators to the existing power supply scheme of the enterprise at the lowest cost for its reconstruction. It is noted that the use of gas turbines is economically justified when selecting the installation under a covering heat load for hot water. This ensures 100 % load gas turbines and boilers operating in the heating season, in the summer time disabled. Accounting for the specifics of gas turbines is required for the planned further mathematical modeling of processes in gas turbine power plants with the aim of improving the process of power generation, optimum performance in steady-state and transient conditions specific to connecting power to the particular configuration of the power supply system. Published in the article the results obtained in the framework of the state order of the Russian Ministry № 13.832.2014/K "Development of methodological fundamentals of adaptive management and non-autonomous self-contained gas turbine power of 25 MW".

Keywords: gas turbine unit, gas turbine power plant, combined cycle plant.

Введение. Газотурбинные установки (ГТУ) являются двигателями внутреннего сгорания, в различных исполнениях они работают на различном топливе. Авиационные ГТУ используют в качестве топлива керосин, наземные ГТУ довольно часто питаются газом. В наземных газотурбинных установках, как правило, используется базовая часть от авиационных прототипов. Имеются свои определенные плюсы и минусы при установке ГТУ для работы на земле [1].

Отечественные предприятия авиационного двигателестроения выпускают газотурбинные установки (ГТУ) для электроэнергетики. При этом согласно [2] примерно 70...75 % основных узлов и деталей базового авиационного двигателя удается сохранить. Газотурбинные электростанции (ГТЭС) на базе таких конвертированных авиационных ГТУ обладают целой совокупностью достоинств, среди них экономичность, низкая стоимость, быстрые сроки окупаемости, малая удельная масса и габариты, высокая мобильность и приемистость, короткие сроки строительства, детально отработанная технология производства, широкий диапазон климатических условий эксплуатации, практически полная автоматизация управления работой двигателя, высокий КПД использования топлива, особенно при когенерации, возможность работы на керосине, дизельном топливе, природном и попутном газе, минимальные объемы вредных выбросов в окружающую среду и др. [3, 4].

Пермский край является признанным центром высокотехнологичного производства газотурбинных установок (ГТУ). Здесь выпускают ГТУ различного назначения: для авиации, для электростанций,

для газоперекачивающих агрегатов, для использования в качестве микротурбин [5].

В настоящей статье сделана попытка систематизировать сведения о проблемах и перспективах применения ГТУ в промышленности. Обзор выполнен по открытым источникам и является первым этапом планируемой в дальнейшем общей систематизации.

Опубликованные в статье результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 13.832.2014/К.

Парогазовые установки. Газовые турбины известны давно, но широко используются в энергетике относительно недавно [6]. В частности, особенно эффективными оказались комбинированные парогазовые установки (ПГУ), в них газовая турбина – первая высокотемпературная ступень использования тепла. Ее выхлопные газы идут в котел, пар из которого поступает на паровую турбину [3, 6].

Основой модернизации тепловых электростанций (ТЭС) могут стать газовые турбины за счет внедрения в старые паровые электростанции новых газотурбинных установок (ГТУ) и получения более современных комбинированных, соответствующих времени. Применение газовых турбин возможно при очень небольших объемах строительных работ на уже имеющихся ТЭС. Они намного легче паровых турбин и компактнее, так как в них отсутствуют тяжелые и объемные паровые составляющие. К тому же управление ими более просто автоматизировать, а это значит, что на таких электростанциях понадобится намного меньше обслуживающего персонала.

Но газовые турбины могут быть высоко эффективными и без применения цикла ПГУ [6]. К примеру [7], если на выходе газовой турбины в теплообменнике выходящими газами греть воду и паром охлаждать горячий тракт турбины вместо воздуха (который очень дорого стоит в обычном цикле), то при температуре газа 1500 °С, достижение которой ставится сейчас как задача, можно говорить об уровне КПД реального газотурбинного цикла порядка 60–62 %. А это в полтора раза лучше, чем в предельном паротурбинном цикле.

Ситуация с производством ГТУ. Ранее применение новых технологий – газотурбинных и парогазовых – сдерживалось из-за отсутствия в нашей стране надежных и экономичных газотурбинных установок.

Во всем мире широко развернута организация производства и применения ГТУ. Уже в 1999 г. заказы, например, американских фирм на газовые турбины насчитывали 200 комплектов, способных выработать 40 млн кВт, что составляет не менее трети мощности энергетики России. Судя по масштабности данных заказов, можно сказать, что инженеры при конструкции станций отводят газовым турбинам очень важную роль [8].

Уже спустя пять лет сложились условия, при которых российская промышленность являлась подготовленной к поставке на электростанции и котельные таких ГТУ. Так, уже в 2005 г. ОАО «Ленинградский металлический завод» поставляло ГТУ мощностью 160 МВт (на базе V94.2); ОАО «Рыбинские моторы» – ГТУ мощностью 2, 5, 6, 8 и 110 МВт; ОАО «Авиадвигатель», г. Пермь, – ГТУ мощностью 2, 5, 4, 6, 12, 16, 25 МВт; ЗАО «Уральский турбинный завод», Екатеринбург, – ГТУ мощностью 6, 16 и 25 МВт; СНТК им. Кузнецова, г. Самара, – ГТУ мощностью 25 и 30 МВт, ФГУП «НПП Мотор», г. Уфа, – ГТУ мощностью 8 МВт; ФГУП ММП «Салют», г. Москва, – ГТУ мощностью 20 МВт.

Но также при желании возможно использование ГТУ, поставляемых из-за рубежа (Германия, США, Англия, Украина и др.) [9].

В качестве примера на рис. 1 показан внешний вид ГТУ, разработанный в ОАО «Авиадвигатель», на рис. 2 – внешний вид газотурбинной электростанции.



Рис. 1. Внешний вид ГТУ-12ПГ-2 мощностью 12 МВт [11]



Рис. 2. Внешний вид электростанции Урал-6000 мощностью 6 МВт [12]

Рассмотренного выше ряда мощностей ГТУ вполне достаточно для использования в теплофикации. Использование парогазового оборудования на ТЭЦ обеспечивает:

- показатели удельной выработки электроэнергии для ТЭЦ с установленными на них ГТУ выше в 1,5 раза в сравнении с паротурбинными станциями на тепловом потреблении;
- уменьшение затрат природного газа (до 25–30 %) по сравнению с ПСУ;
- уменьшение вредных выбросов в атмосферу (для N_{ox} в 2,5–3 раза);
- уменьшение объема строительных и монтажных работ в сравнении с ПСУ (до 20–30 %);
- унификацию и типизацию при проектировании и строительстве источников тепло- и электроснабжения.

Объекты внедрения ГТУ. Объектами внедрения ГТУ могут быть малые и средние промышленные и коммунальные котельные, обеспечивающие до 40 % суммарной тепловой нагрузки страны.

Среди эффективных направлений применения ГТУ в теплофикации находится их совместная работа с водогрейными котлами и паровыми котлами низкого давления по схеме со сбросом газов в топку

указанных котлов. Создание ГТУ ТЭЦ на базе отопительных котельных представляется наиболее дешевым, эффективным и простым техническим решением для снижения затрат топлива на производство электроэнергии.

Реализация таких решений дает следующие преимущества по сравнению с традиционными котельными:

- возможность бесперебойного снабжения собственных нужд котельных;
- экономию топлив, сжигаемых в котельных;
- надежность теплоснабжения жилых районов и промышленных предприятий;
- улучшение экологических показателей энергоисточников.

При этом сохраняется связь котельной с энергосистемой, что обеспечивает надежное покрытие собственных нужд при остановке ГТУ. Кроме того, установленная мощность ГТУ, как правило, превышает потребности собственных нужд котельной, в связи с чем практически всегда имеется возможность отпуска потребителям кроме тепла еще и электроэнергии.

Неравномерность тепловой нагрузки в течение года в каждом конкретном случае требует оптимизации соотношения установленной электрической мощности и тепловой мощности котельной. Задача состоит в обеспечении максимальной выработки электроэнергии при минимальной установленной мощности ГТУ. Проведенный ВТИ-анализ показал, что при сбалансированной схеме включения ГТУ и отопительного котла, при которой весь расход выхлопных газов ГТУ направляется в горелки котла, оснащение всех котлов газотурбинными установками нерентабельно, в зависимости от неравномерности отопительной нагрузки ГТУ должно оснащаться 50–70 % котлов. Для сжигания в водогрейном котле дополнительного топлива будет использоваться кислород, имеющийся в выхлопных газах, в случае недостатка в них окислителя может быть использован воздух от дутьевого вентилятора. При отключении ГТУ сохраняется возможность автономной работы котла на воздухе от дутьевых вентиляторов.

Что касается электротехнических решений по сооружаемым ГТЭС, то главной проблемой является определение места подключения генераторов ГТЭС в существующую схему электроснабжения предприятия с наименьшими затратами на ее реконструкцию. Как

правило, в цепях питания от распределительных устройств 6 или 10 кВ ГТЭС устанавливаются токоограничивающие реакторы для сохранения установленного коммутационного оборудования в существующей схеме предприятия.

Имеются требования заказчика по выполнению расчетов для всех возможных режимов работы электростанции и прилегающей электрической сети как при параллельной работе с энергосистемой, так и при автономной работе турбоагрегатов, а также расчетов статической и динамической устойчивости турбоагрегатов. Наиболее существенным фактором, определяющим устойчивость газотурбинных генераторов, является значительно меньший момент инерции газовой турбины по сравнению с паровой, и, как следствие, для нарушения устойчивости требуется уже значительно меньшее возмущение.

Характерной особенностью расчетов устойчивости газотурбинных генераторов является резкая зависимость их результатов от выбранных расчетных условий. Изменения установленной мощности ГТЭС, места ее расположения относительно других электростанций и узлов нагрузки, пропускной способности связей ГТЭС с остальной энергосистемой могут значительно изменить оценки динамической устойчивости. Поэтому такие расчеты, безусловно, должны явиться совместным продуктом как генпроектировщиков ГТЭС, так и институтов «Энергосетьпроект». Вопросы устойчивости показывают, что задача обеспечения надежного электроснабжения от ГТЭС существует, она достаточно сложна и многогранна.

Выполненные в виде отдельных модулей высокой заводской готовности ГТЭС позволяют производить монтаж на ограниченной площади в непосредственной близости от потребителя или источника газа.

При этом газотурбинные электростанции обладают следующими несомненными преимуществами:

- высокая надежность, показатель наработки до капитального ремонта составляет 25–35 тыс. ч, ресурс основных узлов – до 100 тыс. ч;
- КПД до 88 % достигается не только за счет высокого КПД установки (до 36,4 %), но и за счет утилизации тепла уходящих газов;
- экономичность установок, короткий срок окупаемости (1–3,5 года) при небольшом сроке строительства;
- коэффициент технической готовности достигает 0,99;

– автоматическая система управления и широкая диагностика технического состояния, простота в управлении, минимальная численность обслуживающего персонала;

– высокие экологические показатели: удельные выбросы N_{ox} в пределах 50–150 мг/нм³, СО не более 300 мг/нм³ и уровень шума не более 80 дБ.

В институте «УралВНИПИЭнергоПром» разработаны «Технико-коммерческие предложения», «Обоснования инвестиций» и рабочая документация для различных объектов с различными схемами включения ГТУ в цикл энергоисточников.

Как показывает практика [7], в некоторых случаях не требуется финансирования новых высокотехнологичных энергогенерирующих станций, а достаточной бывает реконструкция или модернизация уже существующих станций с применением новейших технологий. Чем больше рассматривается вариантов и лучше просчитывается перспектива, тем больше вероятность, того, что будет принят оптимальный вариант.

В последние годы проблема нехватки пиковых мощностей (электрических и тепловых) в муниципальных образованиях встает довольно остро. Устаревшее и изношенное оборудование генерирующих станций, передающих сетей, а также рост энергопотребления в крупных городах с каждым годом только усложняют возникшую проблему. Одной из возможностей решения проблемы покрытия пиковых мощностей может быть строительство ГТУ. Время запуска установок довольно короткое, тем самым можно довольно быстро реагировать на рост пиковых мощностей. При надстройке котельной с помощью ГТУ появляется возможность получать дополнительную электрическую энергию в пределах города, тем самым разгружая другие электростанции.

Основная проблема ГТУ – чрезвычайно низкий электрический КПД, особенно при малых мощностях. Следует учитывать и тот факт, что в большинстве ГТУ при уменьшении нагрузки до 50 % электрический КПД газовой турбины значительно снижается, также происходит повышенный износ оборудования. Поэтому при планировании внедрения ГТУ должен учитываться график ее 100%-ной загрузки.

Использование ГТУ экономически оправданно при подборе установки под покрытие тепловой нагрузки на горячее водоснабжение. Тем

самым обеспечивается 100%-ная загрузка ГТУ, а котельные, работающие в отопительный сезон, в летнее время отключаются.

Проблемы конвертирования авиационных ГТУ. Конвертирование авиационных ГТД в наземные установки сопряжено с решением ряда экологических проблем [10–12]:

- уменьшается потребление топлива до 40 % при комбинированном производстве электрической и тепловой энергии, соответственно снижаются уровень теплового загрязнения и выбросы вредных веществ в окружающую среду. Использование в качестве топлива природного газа и новых принципов организации горения также снижает выбросы вредных веществ;

- исключаются выбросы в атмосферу природного газа за счет использования вместо него сжатого воздуха при выполнении работ по очистке и продувке магистральных газопроводов с помощью генератора сжатого воздуха (ГСВ). В этой установке двигатель одновременно является объектом воздействия окружающей среды, в связи с чем установлены закономерности изменения параметров и геометрических размеров элементов газоздушного тракта при работе двигателя в условиях повышенной запыленности воздуха;

- исключается использование химикатов при очистке аэродромных покрытий и путей, а также авиационной техники от атмосферных осадков за счет термокинетического воздействия струйно-тепловой машины на базе авиационного ГТД;

- уменьшается водопотребление и исключается применение химических моющих средств при очистке нефтепромысловых труб от отложений с использованием газопаровой смеси, уменьшаются выбросы вредных веществ до уровня, ниже предельно допустимого, с помощью авиационного ГТД, за счет термокинетического воздействия в сочетании с впрыском водяного пара в камере сгорания установки с коаксиально организованным процессом горения.

Внедрение конвертированных авиационных ГТД в энергоустановки определяется необходимостью:

- повышения технического уровня и эффективности энергопроизводства, строительства, транспорта и других отраслей хозяйства;

- сохранения и поддержания высоких технологий авиадвигателестроения за счет расширения сфер применения этих технологий;

– решения экологических проблем на фоне растущего техногенного воздействия на окружающую среду.

Но, несмотря на много сложностей, возникающих при строительстве и эксплуатации ГТУ, установки данного вида могут решить проблемные задачи по надежному тепло- и электроснабжению промышленных потребителей или жилых районов. В муниципальных образованиях при выделении финансовых средств на реконструкцию или модернизацию систем энергоснабжения необходимо более детально рассматривать проекты внедрения ГТУ.

Заключение. Сделанный обзор позволил сформулировать следующие выводы.

1) ГТУ могут быть эффективны без применения парогазового цикла;
2) наблюдается нарастание мощности производимых ГТУ для ГТЭС;

3) серьезной проблемой является определение места подключения генераторов ГТЭС в существующую схему электроснабжения предприятия с наименьшими затратами на ее реконструкцию;

4) одной из возможностей решения проблемы покрытия пиковых мощностей может быть строительство ГТУ. Время запуска установок довольно короткое, тем самым можно довольно быстро реагировать на рост пиковых мощностей;

5) конвертирование авиационных ГТД в наземные установки сопряжено с решением ряда экологических проблем.

Учет специфики ГТУ требуется при намечаемом в дальнейшем математическом моделировании процессов в ГТЭС.

Библиографический список

1. Опарин Д.А., Кавалеров Б.В. О моделировании газотурбинных установок при управлении электростанциями малой и средней мощности // Вестник Пермского национального исследовательского университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. –2014. – №12. – С. 5–13.

2. Конвертирование авиационных ГТД в газотурбинные установки наземного применения / Е.А. Гриценко, В.П. Данильченко, С.В. Лукачев, В.Е. Резник, Ю.И. Цыбизов; СНЦ РАН. – Самара, 2004. – 266 с.

3. Ольховский Г.Г. Энергетические газотурбинные установки. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 303 с.

4. Интеллектуализация испытаний конвертированных газотурбинных установок для электроэнергетики / Б.В. Кавалеров, В.П. Казанцев, И.А. Шмидт, А.Н. Рязанов, К.А. Один // Системы управления и информационные технологии. – 2012. – №1(47). – С. 84–88.

5. О задачах исследования адаптивного управления электростанциями на базе конвертированных авиационных ГТУ / Б.В. Кавалеров, И.В. Бахирев, Г.А. Килин [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2014. – №11. – С. 65–77.

6. Оценка технико-экономической эффективности модернизации ГТУ-ТЭС с использованием парогазовой технологии / А. Виноградов, В. Григорьев, В. Макаревич [и др.]. – URL: <http://www.bankreferatov.ru/referats/C325729F00717F7B43257B0B0009DBF4/Парогазовые%20установки.doc.html> (дата обращения: 01.05.2015).

7. Газотурбинные установки с утилизацией тепловой энергии // Энергосовет. – 2009. – № 4(4). – URL: http://www.energsovet.ru/bul_stat.php?idd=25 (дата обращения: 01.05.2015).

8. Фаворский Олег ГТУ – основа будущей энергетики // Двигатель. – 1999. – № 6. – URL: http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=305/ (дата обращения: 30.04.2015).

9. Перспективы развития малой энергетики на базе газотурбинных технологий / сост. В.И. Нишневич; УралВНИПИЭнергоПром, (доклад на секции «Малая энергетика и когенерация»). – Екатеринбург, 23 марта 2005 г. – URL: http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=495 (дата обращения: 01.04.2015).

10. Применение авиационных ГТУ в энергетике / Н.С. Сенюшкин [и др.] // Молодой ученый. – 2013. – № 9. – С. 72–74. – URL: <http://www.moluch.ru/archive/56/7730/>

11. Официальный сайт ОАО «Авиадвигатель». – URL: <http://www.avid.ru/energy/engines/ust/?id=16/> (дата обращения: 15.05.2015).

12. Официальный сайт ОАО «Авиадвигатель». – URL: <http://www.avid.ru/energy/engines/el/?id=21> (дата обращения: 16.05.2015).

References

1. Oparin D.A., Kavalerov B.V. O modelirovanii gazoturbinnnykh ustanovok pri upravlenii elektrostantsiiami maloi i srednei moshchnosti [On the gas turbines modelling in case of small and medium power management]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2014, no. 12. pp. 5-13.

2. Gritsenko E.A., Danil'chenko V.P., Lukachev S.V., Reznik V.E., Tsybizov Iu.I. Konvertirovanie aviatsionnykh GTD v gazoturbinnnye ustanovki nazemnogo primeneniia [The converting of aircraft GTE to the ground use gas turbines]. *Samarskii nauchnyi tsentr Rossiiskoi akademii nauk*, 2004. 266 p.

3. Ol'khovskii G.G. Energeticheskie gazoturbinnnye ustanovki [Energy gas turbines]. Moscow: Energoatomizdat, 1985. 303 p.

4. Kavalerov B.V., Kazantsev V.P., Shmidt I.A., Riazanov A.N., Odin K.A. Intellektualizatsiia ispytaniia konvertirovannykh gazoturbinnnykh ustanovok dlia elektroenergetiki [Intellectualization of the converted gas turbines probation for electric power]. *Sistemy upravleniia i informatsionnye tekhnologii*, 2012, no. 1(47), pp. 84-88.

5. Kavalerov B.V., Bakhirev I.V., Kilin G.A. [et al.]. O zadachakh issledovaniia adaptivnogo upravleniia elektrostantsiiami na baze konvertirovannykh aviatsionnykh GTU [On the tasks to research the adaptive power station operation based on converted aircraft gas turbine]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2014, no. 11, pp. 65-77.

6. Vinogradov A., Grigor'ev V., Makarevich V. [et al.]. Otsenka tekhniko-ekonomicheskoi effektivnosti modernizatsii GTU-TES s ispol'zovaniem parogazovoi tekhnologii [Evaluation of technical and economic efficiency of modernization of GTP-CHP with the use of the gas-vapor technology], available at: <http://www.bankreferatov.ru/referats/C325729F00717F7B43257B0B0009DBF4/Parogazovye%20ustanovki.doc.html> (accessed 01 May 2015).

7. Gazoturbinnnye ustanovki s utilizatsiei teplovoi energii [Gas turbines with the thermal energy utilization]. *Energosovet*, 2009, no. 4(4), available at: http://www.energosovet.ru/bul_stat.php?idd=25 (accessed 01 May 2015).

8. Favorskii Oleg. GTU – osnova budushchei energetiki [GTP – the basis of future energy]. *Dvigatel'*, 1999, no. 6, available at: http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=305/ (accessed 30 April 2015).

9. Nishnevich V.I. Perspektivy razvitiia maloi energetiki na baze gazoturbinnnykh tekhnologii [Prospects for the development of small-scale power generation based on gas turbine technologies]. Ekaterinburg, 2005, available at: http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=495 (accessed 01 April 2015).

10. Seniushkin N.S. [et al.]. Primenenie aviatsionnykh GTU v energetike [The use of aviation gas turbines in the energetics]. *Molodoi uchenyi*, 2013, no. 9, pp. 72-74, available at: <http://www.moluch.ru/archive/56/7730/> (accessed 30 April 2015).

11. Ofitsial'nyi sait OAO «Aviadvigatel'» [The official website of "Aviadvigatel"], available at: <http://www.avid.ru/energy/engines/ust/?id=16/> (accessed 15 May 2015).

12. Ofitsial'nyi sait OAO «Aviadvigatel'» [The official website of "Aviadvigatel"], available at: <http://www.avid.ru/energy/engines/el/?id=21/> (accessed 16 May 2015).

Сведения об авторах

Махнутин Алексей Константинович (Пермь, Россия) – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: mahnutin94@mail.ru).

Кавалеров Борис Владимирович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники и электромеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: kbv@pstu.ru).

About the authors

Mahnutin Aleksey Konstantinovich (Perm, Russian Federation) is a student Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: mahnutin94@mail.ru).

Kavalerov Boris Vladimirovich (Perm, Russian Federation) is Doctor of Technical Sciences, Associate Professor the Head of the Department of Electrical Engineering and Electromechanics Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: kbv@pstu.ru).

Получено 06.07.2015