

УДК 621.452

И. В. ИВАНОВ, С. А. СТРУГОВЕЦ, А. Ю. ЧЕЧУЛИН

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ЭНЕРГЕТИКЕ РОССИИ

Рассматриваются проблемы современной энергетики и перспективы использования малоразмерных ГТУ с оригинальными компоновочными схемами, преобразователями и генераторами электроэнергии и законами управления. *Энергетика; малоразмерные ГТУ; законы управления*

В современных условиях России, с учетом изменения структуры собственности в производственной и жилищно-коммунальной сферах, возрастает роль децентрализованного тепло- и электроснабжения. Децентрализация энергетики как концепция ее развития, принята большинством промышленно развитых стран мира. В случае победы этой концепции ее воздействие на цивилизацию можно сравнить с началом эксплуатации персональных компьютеров или сотовых телефонов. По мнению зарубежных аналитиков, уже в 2010 г. 10% электроэнергии в США будут вырабатывать микротурбины мощностью не более 400 кВт. Сочетание централизованного и децентрализованного энергоснабжения для развития малой энергетики в районах с централизованным энергоснабжением, создает новые технико-экономические предпосылки для развития малой энергетики.

Российская электроэнергетика уже с трудом обеспечивает потребности растущей экономики. К сентябрю 2006 г. прирост электропотребления по России составил 4,8%, в Москве, Петербурге, Тюменской области – уже 8%. Износ основного оборудования сейчас составляет по разным оценкам 50–80% для генерирующих установок [1].

### ВАРИАНТЫ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ

В этих условиях возникает необходимость поиска новых энергетических источников, которыми, по мнению большинства экспертов в области ТЭК, в ближайшее десятилетие могут стать только два направления [2]: развитие атомной энергетики и создание в стране альтернативной энергосистемы на базе газотурбинных технологий (ПГУ-технологий).

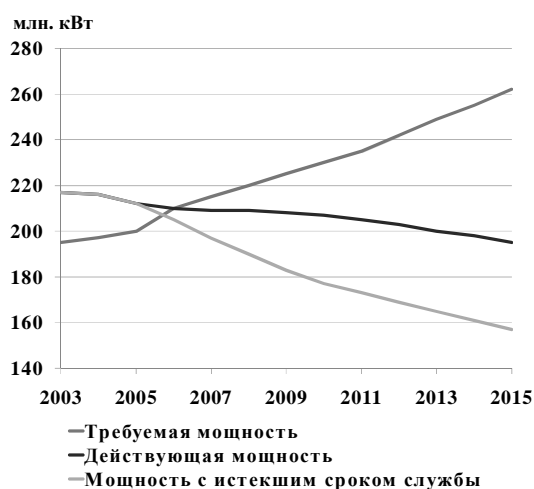


Рис. 1. Баланс установленной мощности (с учетом выбытия) и потребности генерации, млн кВт (так называемый «Крест Чубайса») [1]

Газотурбинные электростанции, работающие по принципу когенерационной схемы, т. е. одновременной выработки электроэнергии и тепла с возможностью регулирования их процентного соотношения, имеют КПД до 97%, не требуют затрат на строительство дополнительных линий электропередачи и, кроме того, решают проблему утилизации попутного газа при добыче углеводородов. В условиях мегаполисов они могут работать даже на газе, вырабатываемом мусороперерабатывающими заводами при утилизации твердых бытовых отходов. Новые технологии уже внедрены в Ивановской области, Санкт-Петербурге, Сочи, Тюмени, Уфе, Калининграде. С учетом будущей газификации Дальневосточного региона, разработки Тихоокеанского шельфа и строительства газопровода из России в Китай применение этих технологий имеет широчайшие перспективы. По данным экспертов [2], экономия газа в масштабах страны за счет реализации «парогазового» сценария на 23% дешевле атомного и срав-

нима с газодобычей. Тем более, что в качестве головных в ядерной энергетике России сегодня рассматриваются энергоблоки типа ВВЭР, производящие только электроэнергию, а не атомные станции теплоснабжения или атомные ТЭЦ, вырабатывающие в том числе и тепло. Внедрение ПГУ-технологий исключает дорогостоящие мероприятия по выводу из эксплуатации атомных энергоблоков и утилизации ядерного топлива, которые делают «атомный» вариант на 50–60% процентов дороже «парогазового» в расчете на замещение единицы природного газа.

Используемые в настоящее время ГТУ разделяются на 2 основных типа [3]:

- Aero-derivative ГТУ – установки, созданные на базе авиационных реактивных газотурбинных двигателей и газотурбинных двигателей для морского использования. Это более форсированные и легкие установки, отличающиеся меньшими требованиями к инфраструктуре, но также и меньшим ресурсом. Такие ГТУ имеют достоинства авиационных двигателей (небольшие вес и габариты, легкость замены двигателя целиком или его отдельного модуля для выполнения высококачественного ремонта в условиях специализированного производства, высокая приемистость, что позволяет использовать их в пиковом режиме). Кроме того, технологии, материалы и покрытия, используемые при создании этих двигателей, позволяют применять их в условиях морского климата: на судах, морских платформах, береговых и прибрежных объектах и т.д.

- Heavy-duty ГТУ – созданные специально для энергетического использования. Это значительно более тяжелые, как правило, одновалные установки, имеющие постоянную частоту вращения, равную частоте вращения генератора, спроектированные по простейшему циклу. Технические решения таких установок соответствуют принципам, исторически сложившимся в энергетическом машиностроении: тяжелый жесткий вал, подшипники скольжения, лопатки постоянного профиля на основном протяжении проточной части (кроме первых ступеней компрессора и последних ступеней турбины) и т. п. Heavy-duty ГТУ предъявляют значительно более высокие требования к строительным работам и инфраструктуре. Срок службы таких установок значительно выше и соответствует значениям, сложившимся в паротурбинных установках.

Создание ГТУ на базе авиационных ГТД, отработавших свой ресурс (так называемое «конверсионное проектирование»), имеет ряд

существенных недостатков [4]. Во-первых, использование ГТД, старых не только физически, но и морально, – серьезная проблема, которая для своего разрешения требует огромного напряжения сил и средств, в том числе и финансовых. Кроме ГТД, необходима силовая турбина, соответствующая обвязка, вспомогательное оборудование и многое другое. И оказывается, что это «остальное» стоит существенно больше, чем сам газогенератор, на котором сэкономили. При этом сами авиационные двигатели – это тонкие, ажурные конструкции с нежными графитовыми уплотнениями, они капризны и не лишены врожденных пороков.

Во-вторых, условия работы авиационного ГТД и промышленной установки сильно различаются, следовательно, различаются они и в проявлении эксплуатационного совершенства. Эксплуатационное совершенство наших газогенераторов закладывалось лет 30 назад, поэтому автоматический перенос старых конструктивно-производственных недостатков плюс привнесение новых из-за смены условий применения в результате приводит к существенному снижению показателей эксплуатационных характеристик, которые в несколько раз ниже установленных. Нарботка на отказ, коэффициент использования и другие основные характеристики современных промышленных ГТУ, построенных на базе авиационных ГТД, существенно ниже, чем хотелось бы. Более того, новая обвязка не улучшает доступность двигательных агрегатов, а проводимая модернизация еще больше закрывает корпуса, делая недоступным выполнение целого ряда операций по их техническому обслуживанию и ремонту.

В-третьих, все современные «конверсионные» ГТУ работают по простому термодинамическому циклу (циклу Брайтона), как правило, это сложные машины с высоконагруженным компрессором, охлаждаемой турбиной, камерой сгорания, не отвечающей современным экологическим требованиям. Создание на базе авиационных ГТД современных экономичных установок, работающих по сложному регенеративному и (или) карнотизированному циклу сильно затруднено конструктивно и требует большого количества времени и средств.

## ПРЕДЛАГАЕМЫЕ РЕШЕНИЯ

Российского потребителя малоразмерных ГТУ сегодня, в основном, интересуют три интегральных показателя, расположенные по значимости в следующей последовательности: надежность (включая ресурс), относительно низкая стоимость (как приобретения установки,

так и ее эксплуатации, включая затраты на ГСМ, куда входит и КПД установки), удобство эксплуатации [5]. В системе математического моделирования тепловых, энергетических и комбинированных установок DVIgWT 6.10 была проанализирована эффективность более 30 схем при номинальной нагрузке установки (в расчетной точке), в основном двухвалных, как традиционных, так и оригинальных (все с регенерацией тепла выхлопных газов). Среди последних:

- схемы с приводом генератора от турбины высокого давления;
- перекрестные блокированные схемы (в которых компрессор высокого давления находится на одном валу с турбиной низкого давления, а компрессор низкого давления на одном валу с турбиной высокого давления);
- схемы с двухступенчатым подогревом газа, поступающего в турбину, и схемы с промежуточным охлаждением сжатого воздуха между каскадами компрессора (так называемые карнотизированные схемы).

В рамках этой задачи исследовались:

- оптимальное соотношение распределения работ между каскадами компрессора;
- влияние промежуточного (между ТВД и ТНД) подогрева на эффективность ГТУ;
- влияние включения в схему промежуточного охлаждения на эффективность ГТУ;
- влияние суммарной степени повышения давления и температуры газов перед турбиной на эффективность ГТУ;
- влияние типа схемы (прямая или перекрестная).

Критерием оптимизации при расчетах являлось получение максимально возможного КПД ГТУ при умеренных параметрах цикла. Результаты расчетов показывают следующее:

1. Сложные карнотизированные схемы без промежуточного охлаждения не дают существенного прироста эффективности по сравнению с простейшей одновальной схемой.

2. Наибольшее значение максимального КПД для схем без промежуточного охлаждения воздуха в компрессоре имеют схемы с подводом тепла перед ТВД.

3. Значительный прирост КПД установки наблюдается до  $T_{г}^* \approx 1300$  К. Дальнейшее повышение КПД компенсируется резким увеличением расхода охлаждающего воздуха в связи с необходимостью охлаждения рабочих колес турбины.

4. Оптимальная степень повышения давления в компрессоре при  $T_{г}^* = 1100 \dots 1300$  К и  $\varepsilon = 0,8 \dots 0,85$  для большинства схем располага-

ется в диапазоне от 4 до 6. С возрастанием  $\pi_k^*$  снижается эффективность регенератора и, соответственно, КПД ГТУ.

5. КПД ГТУ всех схем без промежуточного охлаждения воздуха в компрессоре со ступенчатым или промежуточным подводом тепла при использовании для привода генератора вала ТНД выше на 2...4,5%, чем в схемах с использованием для привода генератора вала ТВД.

6. Введение в схему промежуточного охлаждения позволяет повысить КПД цикла установки на 0,6...8,2% благодаря снижению потребной мощности КВД и увеличению доли тепла, подведенного за счет регенерации. В силу того, что такие схемы конструктивно гораздо сложнее и массивнее схем, работающих по циклу Брайтона, их применение целесообразно для создания ГТУ с электрической мощностью более 10 МВт.

Необходимость снижения эксплуатационных расходов подразумевает, в том числе, поддержание высокого КПД в широком диапазоне режимов работы установки. Это достигается выбором такой программы регулирования привода, при которой во всем эксплуатационном диапазоне поддерживаются максимально возможные температура газов перед турбиной и КПД основных узлов. Основным препятствием к этому является требование жесткого поддержания постоянной частоты (50 Гц) вырабатываемого электрического тока. На данный момент подавляющее большинство энергоустановок выполнено по 2 основным схемам.

1. Схемы с постоянной частотой вращения генератора и его привода (рис. 2). Таким схемам присущ наихудший вариант протекания нагрузочных характеристик (рис. 4).

2. Схемы с постоянной частотой вращения генератора и переменной частотой вращения его привода (рис. 3). По этой схеме выполняются практически все «конверсионные» ГТУ.

ГТУ, выполненные по этой схеме, на режимах пониженной нагрузки имеют лучшую экономичность по сравнению с первым вариантом (рис. 4), но при этом конструктивно сложнее.

Достижения современной электроники позволяют вырабатывать ток постоянной частоты при переменной частоте вращения ротора генератора. Это достигается путем инвертирования в силовом электронном преобразователе (СЭП) тока переменной частоты в постоянный ток, а затем – в ток промышленной частоты. Схема преобразования показана на рис. 5.

Таким образом, отпадает необходимость в применении тяжелого генератора и редуктора

(их заменяет высокоскоростной стартер-генератор (ВСГ)), существенно упрощается схема установки и, что самое важное, решается проблема обеспечения высокого КПД установки в широком диапазоне нагрузок.

Пример конструкции газотурбинной установки с ВСГ показан на рис. 6.

Ниже приведены преимущества данной схемы, которые делают ее практически безальтернативной по сравнению с традиционными схемами, имеющими генератор с постоянной частотой вращения [5]:

- по сравнению с традиционными ГТУ уменьшается вес и размеры установки;
- механическая схема предельно проста. У ГТУ с ВСГ всего один подвижный узел – это ротор, вращающийся на двух подшипниковых опорах. Такие традиционные узлы, как редуктор и коробка приводов, отсутствуют;
- отдельный стартер не требуется – его заменяет сам электрогенератор, обладающий обратимостью, т. е. способностью работать в режиме двигателя;
- еще более существенные преимущества применение ВСГ дает в части эксплуатационных технических характеристик установки;
- так как СЭП позволяет поддерживать постоянную частоту вырабатываемого тока вне зависимости от частоты вращения ротора гене-

ратора (при этом качество поддержания частоты тока выше, чем у традиционных установок), для установки с ВСГ и СЭП может быть выбрана оптимальная программа регулирования частоты вращения ротора, обеспечивающая наилучший вариант протекания нагрузочных характеристик (см. рис. 2);

- установка способна практически мгновенно переходить с режима 100% номинальной нагрузки на режим без нагрузки (холостой ход) и обратно. Это достигается за счет аккумулирования электрической энергии (в аккумуляторных батареях или конденсаторах), которая может использоваться для компенсации пиковых изменений нагрузки. Для традиционных установок, где частота вырабатываемого тока при пиковых изменениях нагрузки поддерживается за счет поддержания механической частоты вращения силового ротора, такие режимы обеспечить практически невозможно;
- электропривод агрегатов позволяет обеспечить их постоянную работу в оптимальном для установки режиме;
- отсутствие механических передач и предельная простота механической схемы обеспечивают высокую надежность конструкции, ее износостойкость, а следовательно, и большой ресурс.

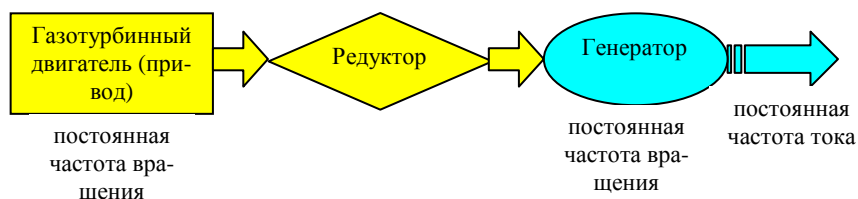


Рис. 2

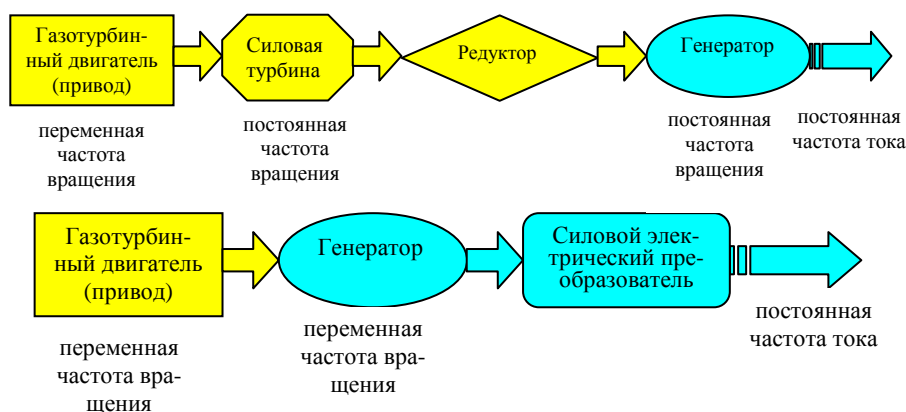


Рис. 3

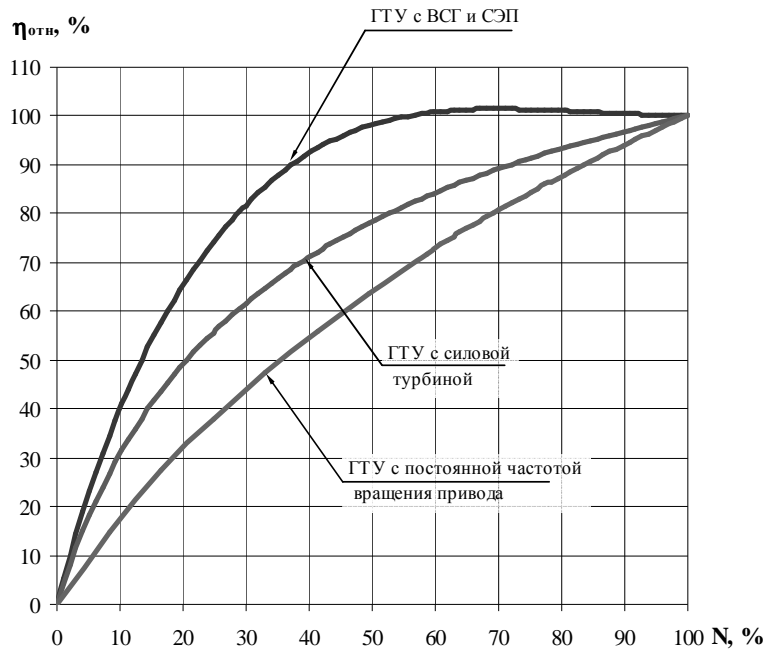


Рис. 4. Сравнение нагрузочных характеристик схем ГТУ

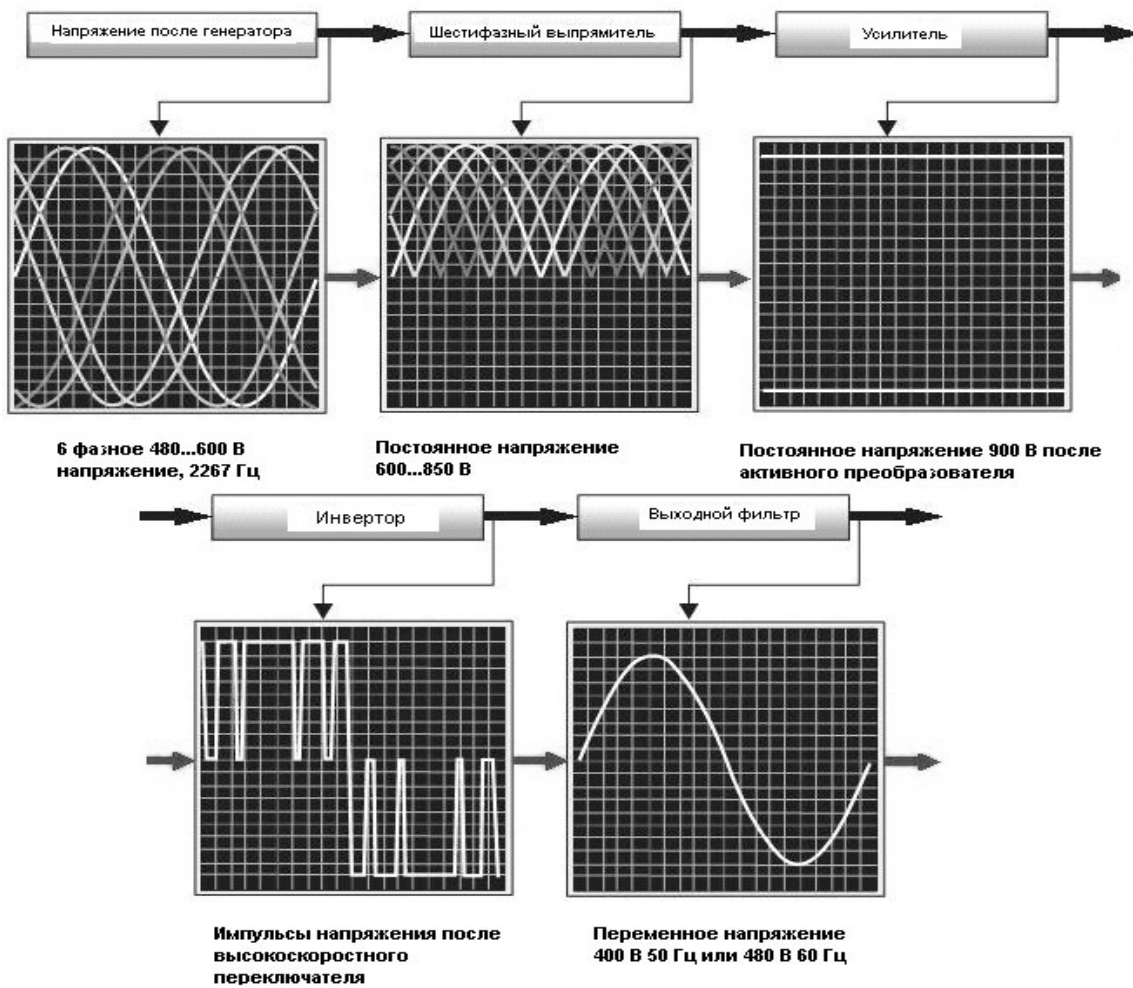
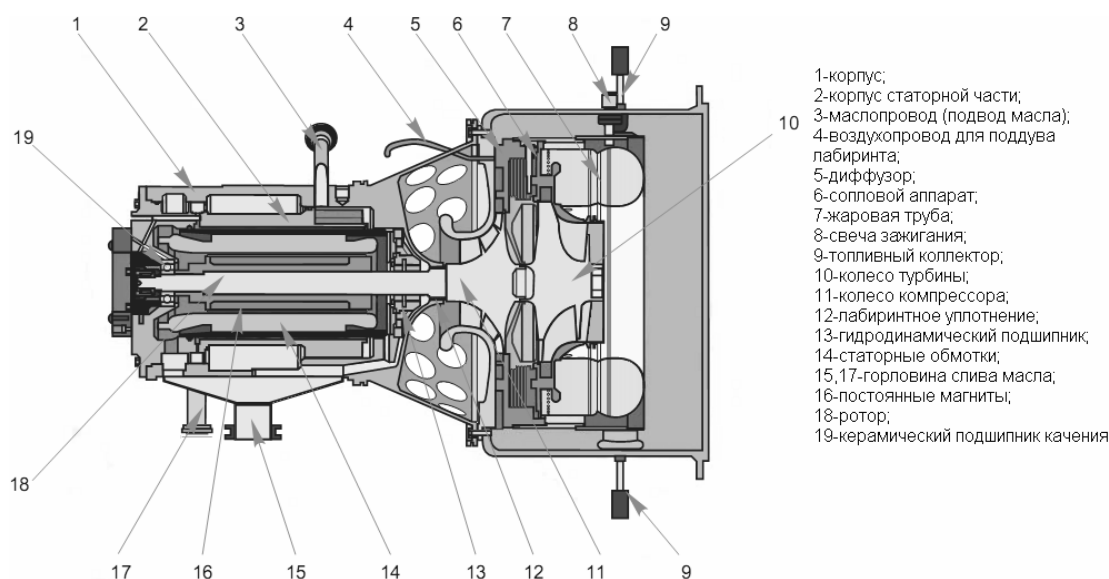


Рис. 5. Последовательность изменения напряжения в блоке силовой электроники



**Рис. 6.** Конструкция установки с высокоскоростным генератором (на примере конструкции ТА-100 компании «Elliott»)

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С каждым годом все острее чувствуется нарастающий дефицит электрических мощностей, устранить который, по мнению большинства экспертов, может создание в стране альтернативной энергосистемы на базе газотурбинных технологий.

Произведенные исследования показывают, что наиболее целесообразной при создании ГТУ является одновальная схема с регенератором, высокоскоростным стартер-генератором и силовым электронным преобразователем, так как она конструктивно проще остальных схем и позволяет получить высокую эффективность в широком диапазоне эксплуатационных режимов. ГТУ, спроектированная по такой схеме, отвечает всем требованиям потребителя и имеет огромный потенциал на рынке энергетики.

### ЛИТЕРАТУРА

1. «Новая генерация: «вторая угольная волна» рынок газа и реформа теплоэнергетики» / Аналитический центр «Эксперт». М., 2005. 67 с.
2. **Поспелова О.** Равнение на «оборонку» [Электронный ресурс] (<http://www.aviaport.ru/digest/2007/04/20/119692.html>).
3. Энергетические газотурбинные установки и энергетические установки на базе газопоршневых и дизельных двухтопливных двигателей. Отчет о НИР / Некоммерческое партнерство «Российское теплоснабжение». М., 2004. Ч. 1. 127 с.
4. **Автушенко Н.** Жизнь после списания [Электронный ресурс] (<http://www.aviaport.ru/digest/2003/05/30/52839.html>).

5. Аванпроект МЭГТУ: Пояснительная записка к плану разработки энергетической газотурбинной установки / ФГУП «УАП «Гидравлика». Инв. № 0540. Уфа, 2008. 35с.

### ОБ АВТОРАХ



**Иванов Иван Васильевич**, асп. каф. авиац. двиг. Дипл. инж.-мех. (УГАТУ, 2007). Готовит дис. в обл. автоматиз. проектирования авиац. двигателей.



**Струговец Сергей Анатольевич**, зам. гл. конструктора ФГУП УАП «Гидравлика» по малоразмерн. ГТД. Дипл. инж.-мех. по авиац. двигателям (УГАТУ, 1982). Иссл. в обл. производства, эксплуатации и анализа работы ГТД авиац. и наземн. применения.



**Чечулин Анатолий Юрьевич**, нач. КО малоразмерных ГТД ФГУП «УАП «Гидравлика». Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1976). Канд. техн. наук по тепл. двиг. (МНПО «Союз», 1989). Иссл. в обл. систем упр. авиац. двиг.