

УДК 621.438-762

В. И. Яишников, А. М. Карпенко*ГП «Ивченко-Прогресс», г. Запорожье***ГАЗОТУРБИННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ ДЛЯ НАЗЕМНОГО ТРАНСПОРТА**

В данной статье представлен газотурбинный двигатель (ГТД) для наземного транспорта. Это двигатель новой схемы с регулированием термодинамического цикла и с биротативной турбиной. Приведены основные параметры двигателя, описана его конструкция, выполнено сравнение с обычными ГТД. Оценены перспективы использования разработанного двигателя в качестве силовой установки для автомобилей.

Ключевые слова: автомобильный газотурбинный двигатель, биротативная турбина, перемещенный цикл двигателя.

Введение

Автомобильный транспорт — один из основных источников загрязнения атмосферы продуктами сгорания органических топлив. Дальнейшие усилия, направленные на снижение токсичности продуктов сгорания автомобильных поршневых двигателей, по-видимому, не приведут к радикальному улучшению их экологических характеристик. Применение различных фильтров и нейтрализаторов значительно увеличивает стоимость двигателей, требует использования редких металлов и повышения качества топлива.

В настоящее время актуальна разработка экологически чистых силовых установок для наземного транспорта на базе газотурбинных двигателей, которые бы могли стать реальной экологически чистой альтернативой поршневым двигателям.

Автомобильный ГТД

Газотурбинный двигатель для автомобиля — это использование всех видов топлива, низкие эмиссии вредных веществ, низкий уровень шума и вибраций, меньший вес и габариты, малый рас-

ход масла, легкий запуск при отрицательных температурах и др. [1–3].

К недостаткам традиционных ГТД относится увеличенный расход топлива, необходимость применения регулируемого соплового аппарата свободной турбины или применение автоматической гидравлической трансмиссии для обеспечения разгона и ускорения автомобиля и другие.

Предлагаемый ГТД с биротативной турбиной и простым способом регулирования термодинамического цикла не только уменьшает или устраняет вышеуказанные недостатки, но и дает много дополнительных возможностей и преимуществ по сравнению с обычным ГТД, что позволяет улучшить и получить новые технические характеристики автомобиля.

Конструктивная схема и особенности предлагаемого ГТД

Схематичный продольный разрез двигателя показан на рис. 1.

ГТД состоит из входного устройства, центробежного компрессора с регулируемым направляющим аппаратом, кольцевой камеры сгора-

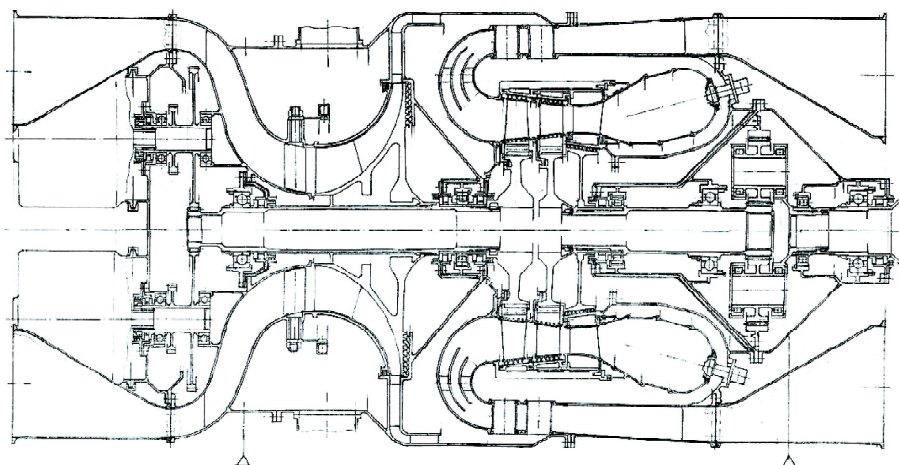


Рис. 1. Схема продольного разреза ГТД

ния (КС), двух ступеней осевой турбины с противоположным вращением и без соплового аппарата между ними, а также выходного устройства. Исследования биротативных турбин выполнены в работах [4–8].

Турбина высокого давления является свободной турбиной (СТ), а турбина низкого давления – турбиной компрессора (ТК).

Предлагаемый ГТД обладает переменным термодинамическим циклом с уникальными свойствами. Простой способ осуществления переменного цикла. В двигателе нет регулируемых лопаток турбины. Изменение параметров цикла двигателя осуществляется за счет изменения оборотов СТ. Уменьшение оборотов смещает на характеристике компрессора точку совместной работы компрессора и ТК на меньшие степени сжатия и увеличенные расходы воздуха за счет увеличения степени расширения ТК. Это позволяет получать необходимые параметры двигателя, в том числе и запасы устойчивости компрессора. Обороты СТ относятся к параметрам регулирования двигателя.

Были выполнены термодинамические, газодинамические, прочностные, гидравлические и другие расчеты предлагаемого двигателя мощностью 800 л.с. Выполнена эскизная компоновка и создана математическая модель двигателя.

За счет переменного цикла работающий двигатель имеет следующие возможности:

- значительное изменение параметров двигателя в зависимости от условий эксплуатации;
- при обнаружении системой контроля и диагностики неисправности двигателя, система регулирования может автоматически и независимо уменьшать температуру газа или обороты роторов без уменьшения мощности двигателя;
- большое изменение (до 20%) и получение необходимых запасов устойчивости компрессора на всех режимах работы двигателя;
- снижение температуры газа на 100...150 К при постоянной мощности двигателя;
- увеличение мощности двигателя на 40...50% при постоянной температуре газа;
- отбор воздуха за компрессором (до 20%) и отбор мощности от ротора ТК (до 40%) при постоянной температуре газа и постоянной мощности двигателя;
- отбор воздуха за компрессором (до 55%) и отбор мощности от ротора ТК (до 100%) при постоянной температуре газа и минимальных оборотах и мощности СТ;
- при суммарном увеличении потерь полного давления на входе на 1%, на выходе из двигателя на 2%, в КС на 1%, уменьшении к.п.д. компрессора на 3%, ступеней турбин на 2%, увеличении отборов воздуха на 2%, и мощности от ротора ТК на 2% возможно получение заданной мощности двигателя без увеличения температу-

ры газа (в обычном ГТД температура газа увеличивается на 150...170 К);

- улучшение запуска двигателя и уменьшение времени приемистости за счет увеличения степени расширения ТК при низких оборотах СТ;
- меньший уровень шума.

Приведенные выше максимальные результаты получены при увеличении оборотов компрессора на 3–4% от оборотов при расчетной мощности двигателя.

Конструкция двигателя приспособлена для применения рекуператора с целью снижения расхода топлива. Простой, легкий и надежный рекуператор со степенью рекуперации 0.4 уменьшает расход топлива на 20%.

В двигателе используются освоенные материалы и технологии. Двигатель находится на самом передовом уровне современных перспективных идей газотурбостроения.

В качестве примера ниже рассмотрим характеристики и особенности ГТД мощностью 800 л.с. для суперавтомобиля и болида Формулы 1.

Двигатель для суперавтомобиля

Двигатель имеет два вала вывода мощности. Вал вывода мощности от СТ и вал вывода избыточной мощности от ТК.

Автомобиль не имеет коробки скоростей и сцепления. Мощность с вала СТ передается прямо на колеса автомобиля, а избыточная мощность от ТК передается на электрогенератор (мощностью 150 л.с. и с оборотами 41000 об/мин) и далее через электромотор на колеса автомобиля. Избыточная мощность на турбине компрессора появляется при низких оборотах свободной турбины, то есть при низких скоростях движения автомобиля. Мощность электрогенератора и электромотора используется, в основном, при старте и ускорении автомобиля.

Электрогенератор и электромотор могут быть заменены на воздушную турбину мощностью 150 л.с., которая использует отбор воздуха на выходе из компрессора или на гидравлическую автоматическую передачу мощностью 150 л.с.

При разгоне автомобиля до скорости 100 км/ч за 3 с номинальная мощность предлагаемого ГТД в два раза меньше, чем у обычного ГТД.

Мощность двигателя – 800 л.с., кратковременно 1050 л.с.,

Обороты двигателя – 8000 об/мин,

Крутящий момент – 1431 Н·м, вес двигателя – 110 кг,

Размеры двигателя: ширина 390 мм, высота 390 мм, длина 800 мм;

Вход воздуха – 4 трубы диаметром 98 мм;

Выход газа – 4 трубы диаметром 106 мм.

В таблице 1 приведено изменение параметров перспективного двигателя при разгоне автомобиля весом 1000 кг от 0 км/час до 400 км/час.

Таблица 1 – Ускорение автомобиля весом 1000 кг

Скорость автомобиля	км/час	0	100	200	300	400
Мощность двигателя	л.с.	0	355	579	741	800
Обороты ТК	об/мин	41000	41000	41000	41000	41000
Обороты СТ	об/мин	0	6575	13150	19725	26300
Обороты двигателя	об/мин	0	2000	4000	6000	8000
Крутящий момент двигателя	Н·м	1431	1247	1017	868	702
Время	с	0	2,99	6,93	12,43	22,93

Таблица 2 – Сравнение вариантов трансмиссии автомобиля

Вариант	Номинальная мощность двигателя, л.с.	Удельный расход топлива, кг/л.с.·час	Мощность трансмиссии, л.с.	Удельный расход топлива при мощности двигателя 260 л.с., кг/л.с.·час
1	800	0,255	150	0,332
2	1600	0,255	0	0,526
3	1000	0,306	1000	0,426

В таблице 2 приведены данные трех вариантов трансмиссий ГТД для суперавтомобиля. Вес автомобиля 1000 кг, время разгона до 100 км/час – 3 с, максимальная скорость 400 км/час. Вариант 1 – предлагаемый двигатель.

Трансмиссия – электрогенератор/электромотор мощностью 150 л.с.

Вариант 2 – обычный ГТД с прямой передачей мощности от СТ на колеса автомобиля. При оборотах СТ до 25 %, что соответствует скорости автомобиля 100 км/час, мощность турбины значительно уменьшается из-за снижения КПД турбины и потерь мощности закрученного потока газа в выходном устройстве. Это приводит к увеличению номинальной мощности ГТД до 1600 л.с.

Вариант 3 – обычный ГТД с трансмиссией электрогенератор/электромотор или автоматическая трансмиссия без прерывания потока мощности (например, гидравлическая). Потери мощности в трансмиссии не менее 20 %. Мощность двигателя и трансмиссии 1000 л.с.

Силовая установка (двигатель и трансмиссия) суперавтомобиля, с предлагаемым ГТД, превос-

ходит силовую установку с обычным ГТД по весу, габаритам, расходу топлива и стоимости.

Предлагаемый двигатель имеет меньший вес и габариты, меньшую стоимость и эксплуатационные расходы, большие ресурс, надежность и живучесть, меньшие стоимость и время на изготовления опытных экземпляров, доводку и сертификацию двигателя.

Перспективы развития двигателей

Присоединение аккумуляторных батарей к электрической сети электрогенератора и электродвигателя позволяет создать гибридный ГТД. Это увеличивает возможности двигателя и автомобиля, в частности: при разгоне и торможении, накопление энергии торможения и др.

Использование керамики. Передача мощности между ТК, СТ и аккумуляторной батареей уменьшает до минимума изменение температур лопаток турбины при изменении мощности двигателя и скорости автомобиля начиная с холостого хода, что позволяет применять в ГТД керамические детали. Параметры такого двигателя приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Параметры двигателя с использованием керамики

Скорость автомобиля	км/час	0, холостой ход	100	200	300	400
Мощность двигателя	л.с.	0	355	483	628	765
Обороты ТК	об/мин	38000	39000	41000	41000	42000
Обороты СТ	об/мин	0	6575	13150	19725	26300
Обороты двигателя	об/мин	0	2000	4000	6000	8000
Температура газа на лопатках ТК	К	939	944	980	981	1002
Температура газа на лопатках СТ	К	1186	1208	1274	1285	1318
Температура воздуха на входе в рекуператор	К	548	560	585	585	598
Температура воздуха на выходе из рекуператора. КПД рекуператора 0.85	К	821	821	841	841	868

Использование рекуператора. Небольшое изменение температур деталей позволяет помимо керамики использовать в таком гибридном двигателе и рекуператор, термические напряжения которого тоже снизятся (по сравнению с его применением в обычном ГТД), что повысит его надежность и долговечность. При этом возможно допускать утечку в рекуператоре до 20% расхода воздуха из-за потери герметичности без уменьшения мощности двигателя.

ГТД для автомобилей Формулы 1 (F1)

Тот же ГТД мощностью 800 л.с. может быть применен для автомобиля F1. В таблице 4 приве-

дено сравнение технических данных автомобиля F1 с обычным поршневым двигателем (соответствующему регламенту соревнований 2010 года) и с предлагаемым газотурбинным двигателем.

Автомобиль F1 с ГТД ни в чем не уступает автомобилю с обычным поршневым двигателем, но имеет следующие преимущества (см. табл. 4):

- использование всех видов топлива, низкие эмиссии вредных веществ.

- большая надежность, ресурс и меньшая стоимость двигателей и трансмиссии, пункты 2.7, 2.8, 3.4, 3.5.

- большая надежность и ресурс шин и тормозов, пункты 5.1.1, 5.1.2, 6.1, 6.2;

Таблица 4 – Сравнение технических характеристик болида F1 с поршневым двигателем и с ГТД

1	Автомобиль		F1	Аналог F1 (с ГТД)
2	Двигатель		F1	ГТД 800 лс
2.1	Мощность	л.с.	800	800
2.2	Крутящий момент	Н·м		1431
2.3	Вес	кг	100	110
2.4	Размеры	мм	518/555/595	390/390/800
2.5	Топливо		Бензин	любое
2.5.1	Удельный расход топлива	кг/л.с.·час	0.200	0.252
2.5.2	Расход топлива при гонке	кг/100 км	52.0	52.0
2.5.3	Расход топлива за уик-энд	л	1200	1200
2.6	Стоимость двигателя	\$	160 000	200 000
2.7	Стоимость двигателей за сезон	\$	2 000 000	200 000
2.8	Ресурс двигателя	час	10	300
3	Трансмиссия		Коробка передач	Электрическая
3.1	Мощность трансмиссии	л.с.	800	150
3.2	КПД		0.8	0.82
3.3	Вес	кг	35	25
3.4	Стоимость коробки	\$	130 000	40 000
3.5	Стоимость коробок за сезон	\$	1 300 000	40 000
4	Расход масла за уик-энд			
4.1	Двигатель	л	70	0.20
4.2	Трансмиссия	л	60	0.05
5	Отбор сжатого воздуха от двигателя		нет	скорость до 150 км/час: Расход 0.9 кг/сек, Давление 6.5 кг/см ² , Температура 320 °С.
5.1	Применение эжекторов с использованием отбора согласно п. 5		нет	Расход 2...5 кг/сек, Температура 50 °С...200 °С
5.1.1	Автономный нагрев и охлаждение шин на стоянке и в движении		нет	Воздухом согласно п. 5.1
5.1.2	Автономное охлаждение тормозов на стоянке и в движении		нет	Воздухом согласно п. 5.1
6	Создание реактивной тяги с помощью эжектора при скорости до 150 км/час	кгс	нет	150 кгс
6.1	Применение реактивной тяги при повороте для уменьшения центробежной силы.		нет	Увеличение скорости при повороте
6.2	Применение реактивной тяги и поглощение энергии торможения генератором электрической трансмиссии		нет	Увеличение эффективности торможения. Торможение со скорости 150 км/час до остановки за 3 сек без применения тормозов
7	Система накопления энергии торможения KERS			Электрическая. Получается добавлением аккумуляторов к электрической трансмиссии (п.3)
8	Увеличение ресурса и надежности шин и тормозов			За счет пунктов 5.1.1, 5.1.2, 6.1, 6.2
9	Температура газа на выхлопе	С	950 °С	750 °С
9.1	Создание граунд-эффекта с помощью выхлопной струи			Более эффективно: меньшая температура газа и больший расход газа
10	Удельный расход топлива при применении теплообменника	кг/л.с.·час	нет	0.170

- меньший расход масла, пункт 4;
- большая скорость перед торможением, при повороте и ускорении, пункты 5, 5.1, 5.1.1, 5.1.2, 6.1, 6.2;
- система KERS с использованием элементов трансмиссии, пункт 7;
- более эффективное создание граунд эффекта, пункт 9.1;
- снижение расхода топлива при применении теплообменника, пункт 10;
- кратковременное (35 секунд) увеличение мощности до 1050 л.с. значительно увеличивает перечисленные возможности и преимущества.

Выводы

Предлагаемый ГТД новой схемы с биротативной турбиной и регулируемым термодинамическим циклом имеет преимущества и новые возможности по сравнению с обычным ГТД и может быть применен для автомобилей, грузовиков, скоростных поездов, катеров и др. Диапазон мощностей – 150 л.с.–3500 л.с.

Список литературы

1. Ю. Елисеев ФНПЦ ММП «Салют» / Ю. Елисеев, В. Николенко // Транспортные автомобильные газотурбинные установки. «Газотур-

- бинные Технологии», январь-февраль 2001. – С. 34-36.
2. Яишников В. И. Малоразмерные газотурбинные двигатели с биротативной турбиной / Яишников В. И. // Авиационно-космическая техника и технология. НАКУ «ХАИ». – 2006. – № 10 (36). – С. 173–174.
3. Gas turbine back on the F1. «Race Tech International», September, 2010, № 119.
4. Ji Lu Cheng. Numerical Investigations about the Vaneless Counter-Rotating Turbine for Cold-Air Test. ASME Paper, GT-2004-53333.
5. Fung Xiang-Jun. Research of a supersonic axial vaneless rotor – rotor turbine. ASME Paper, GT-2008-50509.
6. Fang Xiang-Jun, Liu Si-Yong, Wang Ping. Application of a 3D blade design method for supersonic vaneless contra-rotating turbine. ASME Paper, GT-2008-50510.
7. Zhao Qing-Jun. Influence of hot streak/airfoil count ratios on high pressure stage of a vaneless counter-rotating turbine. ASME Paper, GT-2008-50542.
8. Tomas Grunstedt. A contra-rotating variable cycle turbofan engine. ISABE-2009-1161.

Поступила в редакцию 08.09.2011

Яішніков В.І., Карпенко А. М. Газотурбінний двигун для наземного транспорту

У даній статті представлений газотурбінний двигун (ГТД) для наземного транспорту. Це двигун нової схеми з регулюванням термодинамічного циклу та з біротативною турбіною. Наведені основні параметри двигуна, описана його конструкція, виконано порівняння зі звичайними ГТД. Оцінені перспективи використання розробленого двигуна в якості силової установки для автомобіля.

Ключові слова: автомобільний газотурбінний двигун, біротативна турбіна, змінний цикл двигуна.

Yaishnikov V., Karpenko A. Gas-turbine engine for land vehicles

The gas-turbine engine (GTE) for a surface transport is presented in the current article. This is the new scheme engine with regulation of thermodynamic cycle and with contra-rotating vaneless turbine. Main parameters and design of the engine are presented in the article. Comparison of proposed engine with traditional GTE is also given. Possibilities and perspectives of using of proposed engine as a power plant for automobile were estimated and presented.

Key words: automobile gas-turbine engine, contra-rotating vaneless turbine, variable cycle of engine.