



ПРЕДЛОЖЕНИЕ К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ТОПЛИВНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ



Александр Владимирович Ефимов, ФГУП "ГНЦ ЦиАМ им П.И. Баранова"

На пути создания высокоэффективных двигателей одним из препятствий видится невозможность поставить сразу двигатель "на крыло", но можно применить на первом этапе подобный двигатель на железнодорожном транспорте или дирижабле.

On pathes of creation of high-performance engines with one of interruptings the impossibility sees to put at once engine "on a wing", but it is possible to apply, at the maiden stage the similar engine on a railway transport or airship.

Ключевые слова – двигатель сложного цикла; гибридный двигатель; железнодорожный транспорт малой вместимости; газотурбинный двигатель для дирижабля

Keywords – engine of a composite cycle; the hybrid engine; a railway transport of small capacity; a turbine jet for an airship

С тех пор как наш рынок стал открытым, все уже поняли: в конкурентной борьбе победит при прочих равных условиях тот, чьи изделия будут иметь лучшие параметры. Нельзя сказать, что это не реально. Путь повышения эффективности хорошо просматривается и направления его известны - распределенные энергетические установки, сложные циклы, гибридные схемы энергомашин.

Впрочем, бес, как известно, кроется в мелочах. То, что казалось тривиальным или малосущественным при начале работ, становится совершенно неочевидным и трудно преодолимым в процессе доводки. Очень характерный пример, того - проблемы, возникшие в начале эксплуатации новейшего самолета Боинг -787.

Всерьез это относится и к двигателестроению. Сделать двигатель по новой схеме возможно, но до эксплуатации на летательном аппарате он идти будет очень и очень долго. Впрочем, стоит вспомнить об еще одном направлении применения газотурбинных двигателей - двигателях для железных дорог, для которых процесс доводки возможно ускорить. Здесь вполне применимы гибридные двигатели и двигатели со сложными циклами.

Размерность ГТД турбовозов соответствует размерности вертолетных двигателей, на которых как раз и прорабатывались циклы с регенерацией тепла, а электрический способ передачи мощности позволяет реализовать то, что сейчас включают в понятие "гибридность". Полученные результаты говорят о том, что здесь возможно получение удельных расходов топлива, соизмеримых с удельными расходами дизельных двигателей. В дальнейшем опыт, накопленный на земле, может быть применен и в авиации. Это тем более актуально, если кроме вышеупомянутых "сложных циклов" применить такие нововведения, как:

- закрытое центробежное колесо,
- оптимизированное положение рядов в многорядном центробежном колесе,
- керамический регулируемый сопловой аппарат турбины.

Первый в мире газотурбовоз был заказан в 1939 г. для швейцарских железных

дорог и построен в 1941 г. Его изготовили швейцарские локомотивостроительный завод Винтертур (кузов и экипажная часть) и фирма Броун-Бовери (газотурбинная установка с одновальным двигателем и электрооборудование). Около двух лет газотурбовоз испытывался в Швейцарии, а затем был передан французским железным доро-

гам. К концу 1950 г. газотурбовоз имел пробег около 280 тыс. км. Полученные при регулярной поездной работе локомотива данные позволили установить зависимость коэффициента полезного действия газотурбовоза от его нагрузки. Так, например, при нагрузке 48,8 % от номинальной к.п.д. составлял 11,1 %.

Газотурбовозы по сравнению с другими автономными локомотивами - тепловозами - имеют ряд технико-экономических преимуществ. Газотурбинная установка может использовать более низкосортное жидкое топливо, чем топливо, необходимое для дизеля. Эта установка не нуждается в водяном охлаждении; вес ее ниже веса дизеля такой же мощности, что позволяет легче получить большую мощность локомотива в одной секции. Расход масла у газовой турбины в несколько раз меньше, чем у дизеля благодаря меньшему количеству подшипников и отсутствию поршней.

По сравнению с дизелем газотурбинная установка локомотива имеет и недостатки: более низкий коэффициент полезного действия из-за ограничения температуры газов перед турбиной по условию жаростойкости материала ее лопаток, а также более резкое увеличение расхода топлива на единицу полезной работы при неполной нагрузке турбины.

Высокие технико-экономические показатели газотурбинной установки в условиях авиационной службы определяются длительностью ее работы с постоянной практически полной нагрузкой и низкой температурой окружающего воздуха (-50 °С ... -40 °С). На судах газотурбинные установки также длительно работают с полной нагрузкой, а возможность оборудования установки крупногабаритными теплообменниками позволяет иметь достаточно высокий коэффициент полезного действия независимо от температуры окружающего воздуха. Тогда как локомотивы обычно работают с резко переменной нагрузкой при температуре окружающего воздуха, изменяющейся в широких пределах (от -50 до +40 °С. Да и теплообменник, который обычно легко компонуется на судне, невозможно разместить вместе с другим оборудованием в габаритах железнодорожного вагона

С повышением окружающей температуры мощность газотурбовоза заметно падает. Одновальные газотурбинные установки, у которых газовая турбина и компрессор расположены на одном валу, не могут развивать вращающий момент при нулевой скорости и требуют электрической или гидравлической передачи к движущим колесным парам, как и на тепловозах.

Но любой недостаток можно превратить в достоинство, если вспомнить о подвижном железнодорожном транспорте малой вместимости. Или как его иногда называют, "Кукушке".

Чтобы изучить работу газотурбинных установок на железнодорожном подвижном составе, ВНИИЖТ в 1964 г. создал на базе одного из моторных вагонов двухвагонного дизель-поезда ДП11, эксплуатировавшегося сначала на железных дорогах Германии, а затем на линии Минск-Вильнюс-Рига (см. [2] § 14, 12), экспериментальный турбовозгон.

В качестве первичного двигателя был использован вертолетный газотурбинный двухвальный двигатель ГТД-350 (от вертолета Ми-2) со свободной мощностью тяговой турбины 350 л. с. Расчетная частота вращения тяговой турбины составляла 5900 об/мин, турбокомпрессора при работе под нагрузкой - 45000 об/мин, при холостом ходе - 27000 об/мин. Топливом для двигателя служил керосин, пуск был предусмотрен электрический. Расчетный коэффициент полезного действия равнялся 19 %, масса двигателя была 135 кг.

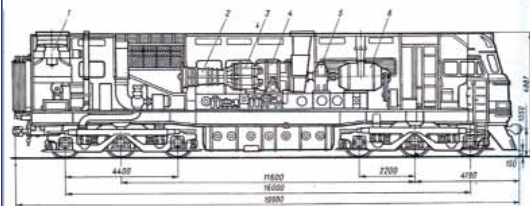


Рис. 1 Турбовоз

Расположение оборудования на опытной секции газотурбовоза ГТД-001 1 - вентилятор холодильника; 2 - входное устройство и компрессор ГТД; 3 - камера сгорания; 4 - газовая турбина; 5 - редуктор; 6 - тяговый генератор



Рис. 2 "Кукушка" Расположение оборудования на турбовозе
1 - пульт управления; 2 - газотурбинный двигатель;
3 - редуктор; 4 - синхронный генератор; 5 - топливный бак;
6 - бензиновый двигатель; 7 - тяговые электродвигатели

колесными парами. Скорость движения вагона регулировалась изменением частоты вращения вала тяговой турбины.

Подвеска электродвигателей была опорно-осевая, тяговые редукторы односторонние с передаточным числом 2,45. Тяговые электродвигатели соединялись с синхронным генератором через контакты реверсора и контакторы переключения обмоток статора. Нагрузка включалась контактором в цепи возбуждения синхронного генератора. Эта цепь питалась от генератора постоянного тока, приводившегося от вала турбины.

На турбовозе была установлена аккумуляторная батарея емкостью 200 А·ч, напряжением 24 В.

Управление газотурбинным двигателем осуществлялось шестнадцатипозиционным контроллером через электропневматический механизм. Вагон имел массу 50 т. Обеспечиваемая тягой скорость турбовоза на площадке равнялась 138 км/ч, конструкционная скорость по экипажной части - 160 км/ч.

Серьезным недостатком экспериментального турбовоза являлась недостаточная сила тяги при нулевой скорости, что не позволяло ему нормально трогаться с места.

После испытаний турбовоза на экспериментальном кольце ВНИИЖТа руководители работ кандидаты технических наук Л. А. Шевченко и С. А. Громов перешли к следующему их этапу - созданию двух более мощных турбовозов на базе дизель-поезда ДП11, позволяющих получить двухвагонный турбопоезд. Для новых турбовозов были выбраны газовые турбины мощностью по 900 л. с. с коэффициентом приспособляемости 2,8 (отношение вращающего момента в стоповом режиме к моменту при номинальной частоте вращения), более высоким, чем у турбины первого вагона. Были также спроектированы и изготовлены синхронные генераторы с максимальной частотой вращения ротора 6000 об/мин и частотой тока 200 Гц. Это позволило смонтировать силовые установки на крышах вагонов, а не размещать газотурбинный двигатель и тяговый генератор в кузове вагона и не занимать место, которое можно было использовать для пассажиров.

Проблема с размещением теплообменников все-таки остается. Расходы воздуха двигателей класса мощности 2000-8000 л.с. также измеря-

ются десятком кг/с, а на каждый 1 кг/с расхода воздуха, по некоторым оценкам, нужно 10 м² площади теплообмена.

Однако, как видно из выше приведенного текста, для подвижного состава меньшей вместимости требуются двигатели мощности порядка 500-1000 л.с., а для такого двигателя теплообменный аппарат получается уже приемлемого размера. По предварительной оценке, габариты теплообменника примерно равны габаритам двигателя.

Примером могут служить двигатели АИ-450, АИ-500, РД-600, ТВ-О-100 и др.

Предварительный расчет проведен для ГТД АИ-450 (вертолетный вариант)

Исходные массогабаритные параметры двигателя:

Габариты двигателя - Диаметр - 515 мм

Высота двигателя - 536 мм

Длина двигателя - 1085 мм

Масса двигателя - 110 кг

Мощность двигат. - 465 лс, удельн. расход топлива - 0,26 кг/лсч, Расход воздуха - 1,72 кг/с

Предварительные расчеты ГТД СТр

Для двигателя, имеющего $T_g = 1200$ К

Степень регенерации - 0,6

Относительное гидравлическое сопротивление - $(1-\sigma) = 0,05$

Гидравлический диаметр каналов - 1.0...5.0 мм

Толщина пластин и ребер - 0,1 мм

На расход воздуха 1,72 кг/с требуется площадь поверхности - 20 м².

Вес регенератора - 70 кг (или 1,36 н/квт)

Для площади теплообменника - 20 м² при диаметре 550 мм и длине 1 м нужно набрать (площадь одной кольцевой пластины - 1,73 м²) 11 пластин. При зазоре 10 мм имеем прирост диаметра 110 мм. Соответственно наружный диаметр - 770 мм.

Или увеличенную на 1 м длину, при сохранении наружного диаметра.

Итоговые массогабаритные характеристики:

Согласно предварительным расчетам применение рекуперативного теплообменника со степенью регенерации - 0,6 приведет при снижении удельного расхода топлива на 15-16%. (т.е до 0,221 кг/лсч) к росту веса двигателя на 70 кг или с 0,236 кг/лс до 0,387 кг/лс, т.е. 64 %

Преимущество ГТД с ТО проявляются при продолжительной работе, более 2-2,5 ч, и увеличиваются с ростом T_g - 1450 К и выше.

При температуре T_g до 1450-1500 К удельный расход топлива снижается на 28-30 % т.е. до значений - 0,186-0,176 кг/лсч

Тем более, что эффективность двигателей еще можно увеличить, применив закрытое центробежное колесо (прирост КПД компрессора на 2%), оптимизировать расположение лопаток в многорядном рабочем колесе (еще 2% КПД компрессора), оптимизировать лопаточный диффузор и, для повышения температуры перед турбиной, применив керамику в турбине газогенератора. Предварительные расчеты для вертолетных двигателей показывают, что для получения оптимальных параметров желательно сопловой аппарат турбины делать регулируемым.

Есть еще один объект, на котором можно использовать подобную ГТУ. Это - дирижабль. При ограничении по массе (что преодолимо), для аппаратов легче воздуха практически отсутствуют ограничения по габаритам. Это позволяет применить ГТД сложного цикла и в этом случае. Для дирижабля можно применить и систему конденсации водяного пара в отходящих продуктах сгорания, как это было реализовано на Цепеллинах. А также подогрев несущего газа теплом отработанных и прошедших теплообменник продуктов сгорания.

Осталось только реализовать. В результате мы получим и эффективную энергетическую установку для РЖД или дирижаблей и возможность изучить эксплуатационные характеристики подобного ГТД.

Литература:

1. Развитие авиационных ГТД и создание уникальных технологий В. И. Бабкин, М. М. Цховребов, В. И. Солонин, А. И. Ланшин Научно-технический журнал "Двигатель" №2 2013
2. Раков В. А. Локомотивы отечественных железных дорог (1956-1975 г.г.) м. Транспорт 1999 г. 443 с.
3. Вертолетные газотурбинные двигатели, сб. статей под. ред. дтн М. М. Масленникова М. "Машиностроение" 1966 г. 200 с.

Связь с автором: krylat@mail.ru

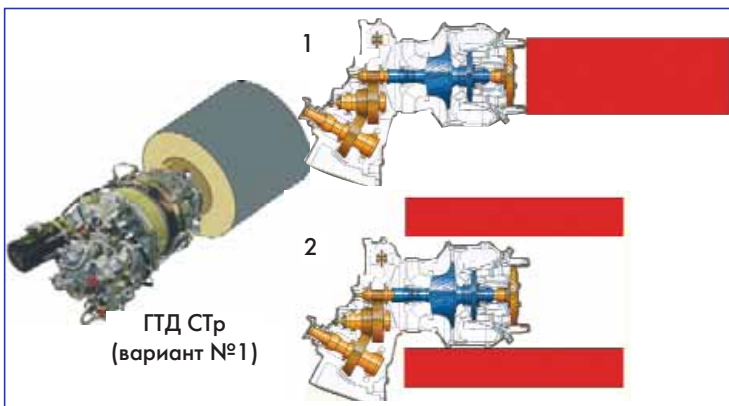


Рис. 3 АИ-500, Варианты расположения теплообменника

