УДК 629.03:62-8:621.438.082

АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НА АВТОТРАКТОРНОЙ ТЕХНИКЕ ЭНЕРГОУСТАНОВОК С ПОРШНЕВЫМИ И ГАЗОТУРБИНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ

Андреев А.А., Деметев А.А.

ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет», Москва,
e-mail: mospolytech@mospolytech.ru

При сложившихся условиях доступности топливных ресурсов и высоких технологий двигателестроения двигатели внутреннего сгорания сохраняют лидирующие позиции в энергоустановках наземных транспортно-технологических систем, что отражается на экологической обстановке. Ее улучшению способствовал бы перевод двигателей на газообразное углеводородное топливо. Одним из факторов, сдерживающих данный процесс, является необратимость перевода обладающих высокой топливной экономичностью дизелей на газовое топливо, приводящая к потере свойства многотопливности. Практический интерес представляют научно-технические работы по созданию энергетических установок с тепловыми двигателями, способными конкурировать с поршневыми двигателями внутреннего сгорания. В этой связи снова обращаются к тематике автомобильных газотурбинных двигателей. Результаты продолжительных периодов работ в стране и за рубежом, практический опыт, обобщенный в изданиях и публикациях классиков направления позволяют представить общую сравнительную картину и оценить перспективы применения. Как исторический экскурс, кратко рассмотрено содержание исторических этапов разработки автомобильных газотурбинных двигателей, приведены примеры. Представлены результаты сравнения: преимущества и недостатки автомобильных газотурбинных и поршневых двигателей. В контексте альтернативы поршневым двигателям внутреннего сгорания в энергоустановках наземных транспортно-технологических систем рассмотрены предложения современного рынка газотурбинных двигателей.

Ключевые слова: поршневой двигатель, газотурбинный двигатель, микротурбина

PISTON ENGINES AND GAS-TURBINE ENGINES: ASPECTS OF USING AS AUTO-TRACTOR POWER INSTALLATIONS

Andreenkov A.A., Dementev A.A.

Moscow Polytechnic University, Moscow, e-mail: mospolytech@mospolytech.ru

By current conditions of affordability of fuel resources and high engine-building technologies the internal combustion engines have been retaining a leading position as power installation for ground transport and technological systems, significantly affecting for the environmental conditions. The transfer of engines on gaseous hydrocarbon fuel would have improved its. One of the hindering factors is irreversibility of transformation process of the high-efficiency diesels for gas fuel, resulting in a loss of the multi-fuel characteristic. There is practical interest in scientific and technical work to create the power installations with heat engines, which capable of competing with piston internal-combustion engines. In this regard the subject of automotive gas-turbine engines has been attracting attention recently again. The results of long periods of the work in the country and abroad, the practical experience, summarized on this direction in the publications, had allowed to provide the overall comparative picture and to assess the prospects. As historic digression, the contents of historical stages of development of the automotive gas turbine engines were briefly reviewed this article. The advantages and disadvantages of the automotive gas turbine and piston engines were formulated by comparing results of using. The proposals of the modern market of gas-turbine engines were considered in the context of alternative to the piston internal-combustion engines as power installations for the ground transport and technological systems.

Keywords: piston engine, gas-turbine engine, microturbine

При доступности топливных ресурсов и развитых производстве и сервисе тепловые машины остаются широко востребованными – улучшение экологии предполагает снижение вредного воздействия автотранспорта в мегаполисах и недопущение загрязнения в рекреационных зонах.

Этому существенно способствовал бы перевод на газообразное углеводородное топливо численно доминирующих поршневых двигателей внутреннего сгорания, тем более – дизелей и турбодизелей, характеризующихся высокой топливной экономичностью.

Благодаря государственной программе, в данном направлении наметился прогресс,

есть положительные сдвиги, но весьма существенны сдерживающие факторы.

Последние можно условно разделить на две группы: эксплуатационно-технические и инфраструктурные, – при этом у некоторых можно заметить сходство к обеим группам [1].

К первой группе относятся: частые дозаправки газомоторной техники, компоновка, установка и стоимость газовой аппаратуры, а также ее технического обслуживания, поддержка автопроизводителями дооборудованных автомобилей, затрудненный пуск газомоторов на холоде, требовательность к качеству газового топлива; особо выделя-

ется проблема многотопливности газодизелей, – об этом ниже.

Вторая – связанная с необходимостью увеличения численности газозаправочных, с расширением сети автомобильных газонаполнительных компрессорных станций, наличием и доступностью сервисных центров для обслуживания газобаллонного оборудования и т.п.

Многотопливность – давняя проблематика дизелей: у углеводородных топлив температуры воспламенения существенно различаются, а достигаемый в двигателе уровень температур обусловлен действительным процессом при данной степени сжатия в дизеле или при общем повышении давления в турбодизеле, с учетом атмосферных условий. При существующих системах и особых конструкциях двигателей, сложных и дорогостоящих, переход на газодизель становится необратимым для использования дистиллятных топлив [2].

Поэтому в условиях сохранения лидирующих позиций за тепловыми машинами актуальны научно-технические работы по энергоустановкам, конкурентоспособным с поршневыми двигателями внутреннего сгорания, но – обладающим выгодными отличиями; в этой связи снова привлекает к себе внимание газотурбинная тематика [3, 4].

Показателен исторический пример: в Швеции, в период с 1966 по 1971 гг., выпустили более 300 танков серии «Stridvagn-103» – основной боевой танк, плавающий, с гидropневматической подвеской, без орудийной башни [5, с. 474–479]; в комбинированные силовые установки с многотопливным дизелем (6-цилиндровый «Роллс-Ройс» К60, расположение цилиндров вертикальное оппозитное, 240 л.с. при 3750 об/мин) был впервые серийно установлен газотурбинный двигатель: «Боинг» 502-10МА (двухвальная схема без теплообменника, разработчиком заявлен как многоцелевой) – модель, 1960 года постройки, с максимальной мощностью 330 л.с.; обороты турбокомпрессора 37500 об/мин, тяговой турбины 29400 об/мин; расход воздуха 1,80 кг/с, степень повышения давления в компрессоре 4,1; габариты двигателя – 1088×610×610 мм.

В силовой установке основным двигателем изначально предполагался экономичный по расходу топлива дизель, а связанный с ним механическим редуктором газотурбинный двигатель должен был периодически подключаться для совместной работы на соответствующих нагрузочных режимах (движение машины в сложных дорожно-грунтовых условиях), использоваться для

пуска дизеля при низких температурах, то есть играть вспомогательную роль.

Но практика эксплуатации потребовала более интенсивного использования газотурбинного двигателя, чем предполагалось ранее, а это существенно снижало запас хода на одной заправке топливом из-за низкой топливной экономичности последнего, выполненного по безрегенеративной схеме.

И для случая военной техники располагаемый запас хода сочли приемлемым, а «существующее положение дел» в целом – положительным и выигрышным.

Поэтому в утяжеленной на 10% модификации машины (42,5 т) энергоустановку скомпоновали из 6-цилиндрового дизеля «Детройт дизель» 6V-53T, мощностью 290 л.с. при 2800 об/мин, и газотурбинного «Боинг 553», мощностью 500 л.с. – явное смещение акцента в пользу газотурбинного двигателя – при 3800 об/мин выходного вала редуктора.

Данный пример – не только иллюстрация использования газотурбинных двигателей на наземной технике, но и наглядное практическое подтверждение актуальности тематики: к тому времени уже сформировались предпосылки комплексного подхода к проектированию и разработке газотурбинных двигателей автотракторного назначения.

Была раскрыта несостоятельность использования обычного дефорсированного авиационного одновального двигателя на наземном транспорте с механической трансмиссией: крутящий момент такого двигателя возрастает от нулевого до максимального значения с увеличением оборотов ротора, поэтому значение, необходимое именно при трогании автомобиля, достигалось бы здесь с ростом скорости автомобиля. Как следствие, автомобиль с таким двигателем не сможет тронуться с места без использования дополнительных устройств, изменяющих крутящий момент [6, с. 279–283].

Вместе с тем вызвало интерес использование одновального газотурбинного двигателя для привода электрогенератора, обеспечивающего электрической энергией мотор-колеса в автомобиле с электрической трансмиссией: бескарданное расположение со значительными углами поворота мотор-колес, у каждого из которых характеристика крутящего момента от скорости вращения имеет гиперболический вид, обуславливает повышенную проходимость машины по бездорожью и пересеченной местности. Но, как сдерживающие факторы, – ограниченный запас хода на одной заправке топливом (низкая топливная экономичность) при двойном преобразовании энергии, высокая стоимость медесодержащих компонентов

электрической трансмиссии, проблемы длительной эксплуатации электромоторов в загрязненной (запыленной) среде.

Опыт 1950–1960-х гг. по установке на шасси двухвальных безрегенеративных газотурбинных двигателей – адаптация вертолетных двигателей, с весьма выгодной характеристикой крутящего момента, – выявил принципиальные недостатки такой концепции. Вскрыв технические проблемы адаптации и приспособления существующих авиационных газотурбинных двигателей к характеристикам наземных средств, предложили способы их устранения, которые существенно усложняли известные на тот момент конструкции, увеличивая их массу и стоимость. Но, главное, были созданы основы комплексного подхода к проектированию и разработке собственно автотракторных газотурбинных двигателей, что позволило говорить о конкурентоспособных по топливной экономичности вариантах.

В нашей стране почти за семьдесят лет работы был накоплен богатый научно-практический опыт, не уступающий зарубежному [7–9].

Классики направления Г.Ю. Степанов, М.А. Коссов, А.Е. Зарянкин, А.Н. Шерстюк, М.Е. Дейч, И.В. Котляр, Н.С. Попов, В.П. Изотов, Ю.А. Чумаков систематизировали и обобщили его в научных монографиях и в учебных изданиях. Существующие материалы позволяют провести обобщенный сравнительный анализ поршневых и газотурбинных двигателей автотракторного назначения.

При сравнении с поршневыми двигателями аналогичной мощности и временной актуальности можно сформулировать следующие преимущества газотурбинных двигателей.

1. Масса газотурбинного двигателя существенно меньше; в ряде моделей она не превосходит 25–30% массы поршневого двигателя, что позволяет облегчить моторную раму, повысить грузоподъемность автомобиля.

2. Габариты газотурбинного двигателя существенно меньше: габаритный объем в разы меньше объема поршневого двигателя, что упрощает компоновку двигателя на шасси; размещение становится удобным с позиции доступа к двигателю и оптимального распределения нагрузки на оси транспортного средства – целостным подходом к проектированию рационально разрешается важный вопрос газовоздушных коммуникаций теплообменников.

3. Характер протекания кривой крутящего момента от числа оборотов у тяговой

турбины является благоприятным: наибольший момент соответствует троганию машины с места (заторможенное положение тяговой турбины), затем, с ростом оборотов, практически линейно снижается – запас крутящего момента существенный.

4. В качестве топлива может использоваться любое дистиллятное топливо. При переходе с одного предусмотренного вида топлива на другой перенастройка системы питания требует незначительной регулировки, а действия персонала, как правило, сводятся к подаче сигнала – дальнейшее выполняется системой автоматического управления.

Следует заметить, в авиационных газотурбинных двигателях заправочное топливо – авиационные керосины – одновременно является рабочей жидкостью гидромеханических контуров системы управления и регулирования, что в этом случае делает общий разговор о многотопливности некорректным.

В гидросистемах управления многотопливных газотурбинных установок и двигателей циркулирует рабочая жидкость постоянного состава (масло).

Возможность использования газового топлива предусматривается универсализацией топливоподающей аппаратуры, прежде всего топливного насоса и блока камеры сгорания; представляется целесообразным при переходе на природный газ проводить замену блока камеры сгорания, как это практикуется в газотурбинных установках для малой энергетики, – для быстроты смены выполнен выносным, – вместо форсунки устанавливается горелка.

5. Отработанные газы малотоксичные, так как горячие газы получаются при больших коэффициентах избытка воздуха, значения которых в несколько раз выше, чем в турбодизелях.

6. Конструкция газотурбинного двигателя проще конструкции поршневого двигателя и имеет поузловую схему по ходу течения рабочего тела.

7. Существенно меньше количество пар трения скольжения и нагрузки на подшипники, что обуславливает большой межремонтный пробег; в опорах роторов двигателей известных конструкций используются специальные подшипники качения, спроектированные и изготовленные по авиационным нормам.

8. Обслуживание газотурбинного двигателя занимает меньше времени из-за отсутствия или существенного упрощения систем, требующих постоянного наблюдения (например, система жидкостного охлаждения).

9. Облегчен запуск на холоде из-за отсутствия сопротивления остывшего загустевшего масла (подшипники качения), необходимости разогрева масла и прогрева охлаждающей жидкости, что делает двигатели особенно привлекательными для использования в климатических районах с преобладанием низких температур.

10. Расход масла на угар в десятки раз меньше, также существенно ниже его подача и давление (узлов двигателя, к которым осуществляется подача масла, в основном струйная, мало, и исключен непосредственный контакт между маслом и горячим газом).

11. Время выполнения предусмотренных при эксплуатации газотурбинного двигателя ремонтов меньше, потому что его конструкция проще, рабочие узлы обособлены, их масса мала, но работы проводятся только на специализированных ремонтных предприятиях и ремзаводах; двигатель легко демонтируется для транспортировки (у советского танка Т-80БВ газотурбинный двигатель выполнен в блоке с редуктором, бортовыми планетарными коробками передач и приводными агрегатами – масса моноблока 1050 кг [5, с. 403]).

12. Возвратно-поступательные движения масс и крутильные колебания отсутствуют, работа спокойная, что упрощает меры по амортизации и демпфированию энергетической установки, создает благоприятные условия для функционирования систем и оборудования при работающем двигателе.

13. Малая масса и компактные размеры, наряду с возможностью получения большой мощности в одном агрегате и дистанционным управлением, делают газотурбинные двигатели весьма привлекательными для использования на большегрузных автопоездах, с активными прицепами и полуприцепами, и в качестве вспомогательных энергоустановок.

Номенклатура серийных моделей газотурбинных двигателей автотракторного назначения ограничена, что не может не вызывать некоторый скепсис, – глобальный всплеск приходился на 1950–1960-е гг.: автомобильные заезды на рекорд скорости – «погоня за жар-птицей»: стремление преодолеть на автомобиле звуковой барьер. Тогда к газотурбинной тематике проявлял интерес и массово вовлекались и государственные организации, и фирмы-гиганты, предчувствующие выгоду, и студенческие бюро, и отдельные конструкторы-энтузиасты, чему способствовала политико-экономическая ситуация момента в промышленно развитых странах, в отли-

чие от последующих десятилетий, когда работы, сориентированные на «оборонные задачи», сконцентрировались на «закрытых объектах».

Серийные разработки, освещенные в технической литературе поздних периодов [8], в большинстве своем – воплощение достижений тех лет; но деятельность в этом направлении никогда не прекращалась полностью – приобретая спорадический характер, оставалась в поле зрения передовой технической мысли.

На кафедре «Энергоустановки для транспорта и малой энергетики» Московского Политеха ведутся работы в данной области: по высоким параметрам и характеристикам созданные образцы, аккумулирующие результаты прогрессивной конструкторской и научно-исследовательской деятельности, превосходят известные военные и экспериментальные модели турбомашин и автотракторных газотурбинных двигателей.

Как показала практика, необходимо учитывать следующие обстоятельства.

1. Для производства требуются дорогостоящие высоколегированные материалы, высокий уровень технологии изготовления и сборки.

Весьма перспективные неметаллические материалы – конструкционные керамики, керамокомпозиты, – известные не одно десятилетие и новые, представлены здесь не столь широко, по-видимому, из-за специфических свойств, диктующих особые условия и требования при конструировании [10, с. 41–45], высокой стоимости и «закрытости» технологии изготовления, а также ограниченных статистических данных для гарантированного прогноза надежности изделий [11].

2. При положительных температурах окружающей среды топливная экономичность лучших разработок уступает турбодизелям, в отличие от применения в климатических зонах с отрицательным среднегодовым уровнем температур.

3. Значительные частоты вращения роторов требуют высокоточной динамической балансировки, а также применения редукторов (основного и привода вспомогательных механизмов) с большими передаточными числами.

4. Необходимы аккумуляторные батареи большой емкости для работы запального устройства при запуске, а также для привода масляного насоса по окончании работы, чтобы охлаждать подшипники роторов, не допуская коксования в них масла от тепловых потоков, идущих к валу от горячих рабочих лопаток.

5. Повышенные требования к очистке воздуха и его большие массовые расходы требуют тщательной проработки системы воздухообмена, вопроса шума воздуха на всасывании компрессором, а также пунктов, сопряженных с теплообменником.

6. Большой объем отработанных газов и чувствительность турбин к противодавлению на выпуске нуждаются в проработке отводящей системы и надежной и эффективной конструкции теплообменника.

7. Двигатель требует, можно сказать, высокой культуры эксплуатации, обслуживания и ремонта.

Отмеченные положения, являясь своего рода сдерживающими факторами, решаются при комплексном подходе к системе: «проектирование», «производство», «сервис и обслуживание».

Вновь обострившийся интерес к энергоустановкам с газотурбинными двигателями связан с успехами фирмы Capstone Turbine Corporation (США).

Сфера деятельности компании – высокоэкологичные газотурбинные установки мощностью от 30 кВт до 1 МВт, которые, не без участия маркетологов, получили наименование «микротурбины» для отличия от установок для большой энергетики.

Компания вышла на рынок автомобильной техники: микротурбины Capstone С30, многотопливные рекуперативные, работают как турбогенераторы, выполняя безостановочную подзарядку бортовых аккумуляторов десяти экологичных гибридных автобусов в городе Ньюкасл (Великобритания).

Высокие результаты и достижения в области автотракторного газотурбостроения позволяют заключить, что микротурбины,

сочетая в себе выгодные характеристики с соответствием экологическим требованиям, составят в ряде областей применения полноценную конкуренцию поршневым двигателям внутреннего сгорания.

Список литературы

1. Макарова И.В. Перспективы и риски перевода автомобильного транспорта на газомоторное топливо / И.В. Макарова, Р.Г. Хабибуллин, Л.М. Габсалихова, И.И. Валиев // *Фундаментальные исследования*. – 2013. – № 10–6. – С. 1209–1214.
2. Шатров М.Г. Двигатели автотракторной техники / М.Г. Шатров, К.А. Морозов, И.В. Алексеев. – М.: Кнорус, 2016. – 400 с.
3. Андреенков А.А. Поршневые и газотурбинные энергетические установки для наземных транспортно-технологических средств / А.А. Андреенков, А.А. Деметьев, А.В. Костюков. – М.: Московский Политех, 2017. – 80 с.
4. Мельник Г.В. Микротурбины // *Двигателестроение*. – 2009. – № 2. – С. 35–40.
5. Полная энциклопедия танков мира. 1915–2000 гг. / Составитель Г.Л. Холявский. – Мн.: ООО «Харвест», 2000. – 576 с.
6. Степанов Г.Ю. Основы теории лопаточных машин, комбинированных и газотурбинных двигателей / Г.Ю. Степанов. – М.: Машгиз, 1958. – 352 с.
7. Системы повышения эффективности работы автомобильных энергоустановок / Н.А. Хрипач, Л.Ю. Лежнев, Ф.А. Шустров и др. – Ставрополь: ЦНЗ «Логос», 2017. – 38 с.
8. Транспортные машины с газотурбинными двигателями / Н.С. Попов, С.П. Изотов, В.В. Антонов и др. / под общ. ред. Н.С. Попова. – Л.: Машиностроение: Ленинградское отделение, 1987. – 258 с.
9. Чумаков Ю.А. Теория и расчет транспортных газотурбинных двигателей / Ю.А. Чумаков. – М.: ИНФРА-М; Форум, 2012. – 448 с.
10. Костюков А.В. Осевые турбины транспортных ГТД / А.В. Костюков, А.А. Деметьев, А.А. Андреенков. – М.: Московский Политех, 2016. – 56 с.
11. Костюков А.В. Расчет на прочность дисков малоразмерных турбомашин / А.В. Костюков, А.А. Андреенков. – М.: Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ), 2012. – 88 с.