

ПРИМЕНЕНИЕ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ – РАДИКАЛЬНЫЙ СПОСОБ УЛУЧШЕНИЯ ТОПЛИВНОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ НАЗЕМНЫХ МАШИН С ГАЗОТУРБИНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Н.И. Троицкий

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: niktro17@rambler.ru

Рассмотрены сравнительные данные по эксплуатационной топливной экономичности внедорожных машин с газотурбинными двигателями и дизелями. Показаны возможности снижения расхода топлива таких машин на различных эксплуатационных режимах, в том числе на режимах “малого газа”. Путь расход топлива машин с газотурбинными двигателями в значительной мере зависит от условий эксплуатации и среднего уровня загрузки двигателя. На расход существенно влияет продолжительность работы на тормозных и стояночных режимах и в области низких (менее 40... 50 % максимальной мощности) нагрузок. Уменьшить высокие расходы топлива машин с газотурбинными двигателями (по отношению к дизелю) на этих режимах практически невозможно, поэтому работа транспортных машин с газотурбинным двигателем на режимах малых нагрузок и при стоянке машины должна обеспечиваться с помощью накопителей энергии. Расчеты показывают возможность снижения на 20... 50 % путевого расхода топлива при эксплуатации машины с газотурбинным двигателем и накопителем энергии в зависимости от условий движения.

Ключевые слова: транспортная машина, газотурбинный двигатель, дизель, путь расход топлива, режим малого газа, накопитель энергии.

USING ENERGY ACCUMULATORS IS THE RADICAL WAY FOR IMPROVING EFFICIENCY OF GROUND-BASED VEHICLES WITH GAS-TURBINE ENGINES

N.I. Troitskiy

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: niktro17@rambler.ru

The comparative data on operational fuel efficiency of the off-road vehicles with gas-turbine engines and diesels are examined. The possibilities to reduce the fuel consumption of these vehicles under different operating conditions, including the idling, are shown. The en-route fuel consumption of vehicles largely depends on the operating conditions and average load of the engine. The fuel consumption is greatly influenced by duration of idling, braking, and low-load regimes (below 40–50 % of the maximum capacity). To reduce high fuel consumptions of gas-turbine vehicles (relative to a diesel) in these regimes is almost impossible, and so the work of gas-turbine vehicles in regimes of low loads and when they are parked has to be ensured by using energy storages. The calculations show the possibility to reduce by 20–50 % the en-route fuel consumption in operation of a gas-turbine vehicle with the use of energy storages depending on the traffic conditions.

Keywords: transport vehicle, gas-turbine engine, diesel, en-route fuel consumption, idling, energy storage.

В последнее время возрастает интерес к применению газотурбинных двигателей для силовых установок наземного транспорта. Об этом

свидетельствуют работы ООО “Курганмашзавод” (перспективная боевая машина пехоты “Рыцарь”), ООО “КАМАЗ” (платформа легкой серии), а также продолжающаяся в Самарском ОАО “Кузнецов” и ФГУП “НПЦ газотурбостроения “Салют” доводка двигателей для газотурбовозов.

Появившиеся в последние годы полемические статьи по сравнению технико-экономических характеристик отечественных танков с турбопоршневыми (ТПД) и газотурбинными (ГТД) двигателями [1–4] носят в значительной мере конъюнктурный характер и не направлены на поиск путей дальнейшего совершенствования двигателей. Не останавливаясь на многих, нередко противоречивых, факторах, рассмотрим один из основных аспектов их сравнения, а именно — топливную экономичность машин с различными типами силовых установок.

Начиная с 1980-х годов за время эксплуатации танков Т-80У, которые являются единственной в РФ серийной наземной машиной с ГТД, накоплены многочисленные материалы по их топливной экономичности в различных условиях эксплуатации [1, 4]. Основываясь на результатах испытаний Т-80У с ГТД-1250 и Т-72 с дизелем В-84М, авторы сходятся во мнении, что путевая экономичность танка Т-80У на длительных маршах примерно в 1,6... 1,8 раза хуже соответствующего показателя танка Т-72. По данным эксплуатации указанное соотношение доходило до 2,3... 2,5 раз [4], что было вызвано продолжительным временем работы двигателя на режимах малого газа (МГ), которое в рассматриваемых случаях по условиям движения доходило до 50 % и более.

Установилось мнение, что эксплуатационная топливная экономичность транспортной машины в основном зависит от удельного расхода топлива двигателя на расчетном режиме. За этот показатель борются, его, как основной, задают при проектировании, по нему сравнивают разные двигатели. При прочих равных условиях такое мнение справедливо, но анализируя эти прочие условия, можно показать, что эксплуатационная экономичность машины ухудшается не только от нерационального управления, но также из-за значительных невосполнимых потерь, связанных с характеристиками двигателя.

Путевой расход топлива (ПРТ) является функцией многих параметров и характеристик двигателя, машины и трассы. Безусловно, основное влияние на ПРТ оказывает экономичность двигателя — его удельный расход топлива на расчетном и частичных (эксплуатационных) режимах, а также расход топлива на режиме МГ, в меньшей степени — его динамические и тормозные характеристики. Путевой расход топлива возрастает с увеличением удельной мощности двигателя (по отношению к массе машины) и с увеличением коэффициента сопротивления движению. Удельная мощность двигателя зависит также от способа управления двигателем и квалификации механика-водителя.

Работа двигателя на неэффективных режимах, вызванных нерациональным выбором передачи в КПП или некорректным управлением регулируемым сопловым аппаратом силовой турбины (РСА ТС), по расчетной оценке может дать перерасход топлива от 5 до 20 %.

Среди различных способов обеспечения тормозных качеств транспортного ГТД со свободной турбиной только один (с управляемой муфтой связи валов этой турбины с турбокомпрессором) позволяет выполнять торможение двигателем с отключением подачи топлива. При всех остальных способах, в том числе при использовании РСА ТС, расход топлива на тормозных режимах в лучшем случае соответствует расходу на режиме МГ или превышает последний. Таким образом, учитывая, что для транспортного ГТД продолжительность режимов МГ при эксплуатации может составлять 15...30% [4], не считая отмеченных ранее крайних случаев, когда она достигает 50%, а продолжительность тормозных режимов составляет 3...8%, можно предположить, что ГТД в среднем четверть своего времени работает с расходом топлива, соответствующим режиму МГ.

Абстрагируясь от других факторов (влияния способа управления, динамических характеристик ГТД, характеристик машины, ее трансмиссии и трассы), рассмотрим зависимость ПРТ от трех основных характеристик двигателя — удельного расхода топлива, протекания нагрузочной характеристики и расхода топлива на режиме МГ.

Удельный расход топлива на расчетном режиме. На первый взгляд, этот параметр должен в первую очередь определять ПРТ при прочих равных условиях. Как правило, под удельным расходом топлива C_{e0} обычно подразумевается стендовый (условный) удельный расход топлива. Переход к объектовым условиям работы ГТД (с сопротивлениями на входе 5...7 кПа и выходе $\sim 1,5$ кПа) дает повышение этого значения и снижение мощности в зависимости от параметров двигателя и типа системы очистки воздуха на 14...20%.

Логично, что при анализе влияния на ПРТ термодинамического совершенства двигателей следует сравнивать показатели их удельного расхода топлива в объектовых условиях, отнесенные к мощности на ведущем колесе, с учетом всех объектовых потерь и отборов мощности.

В настоящей статье не ставится целью изучение факторов, влияющих на удельный расход топлива на расчетном режиме. Отметим, что для транспортного ГТД в этом плане основными направлениями являются повышение температуры при умеренных отборах воздуха на охлаждение, в том числе в перспективе — с использованием конструкционных керамических материалов (ККМ), а также применение теплообменника с высокой степенью регенерации.

До практического внедрения ККМ, отработки технологий производства и надежности конструкций “горячих узлов” из керамики в

составе транспортных ГТД ожидать резкого улучшения удельного расхода топлива ГТД не приходится. Тем не менее, за счет применения стационарного теплообменника с высокой степенью регенерации (на уровне 80...82 %) можно получить улучшение до 20 % расчетной топливной экономичности по сравнению с современным уровнем, что реализовано в американском двигателе LV-100 (фирмы General Electric и Honeywell), в котором достигнут $C_{e0} = 201$ г/кВт·ч (по рекламным данным).

Изменение удельного расхода топлива по нагрузочной характеристике. Транспортный двигатель большую часть времени работает в области частичных нагрузок в пределах 40...60 % максимальной мощности [4] в зависимости от условий движения, удельной мощности машины и других факторов.

На этих режимах удельный расход топлива ГТД без дополнительного регулирования существенно увеличивается — по расчетам, на 50 %-ной мощности в среднем на 24...27 % по отношению к номинальному режиму. Это относится как к двигателям без теплообменника, так и с теплообменником, если в них не применены способы дополнительного регулирования — РСА силовой турбины или управляемая муфта связи валов в целях программного регулирования температуры газа. Последнее позволяет в двигателях с теплообменником получить снижение до 30 % удельного расхода топлива на частичных по мощности режимах двигателя.

Обеспечение плавности зависимости $C_e = f(N_e)$ в широком диапазоне режимов по мощности ГТД, осуществляемое за счет программного регулирования температуры газа, ограничивается допустимым запасом устойчивости компрессора $\Delta K_{y_{\min}}$ уже при $N_e = 40...60$ % максимальной мощности. При этом расчетный режим двигателя выбирается с запасом устойчивости не менее 25 %, что, безусловно, сказывается на снижении КПД компрессора и, следовательно, экономичности ГТД на этом режиме.

Следует отметить, что эффективность улучшения удельного расхода топлива ГТД на частичных режимах повышается с ростом степени регенерации σ и только при $\sigma = 0,75...0,82$ при снижении мощности до 60...40 % $N_{e_{\max}}$ можно получить удельный расход топлива, не превышающий расчетного значения. На более низких режимах по мощности регулирование двигателя может происходить только при $\Delta K_y = \text{const}$ или при постоянстве угла установки РСА, что вызывает резкий рост удельного расхода топлива.

Таким образом, программное регулирование температуры газа не решает вопроса кардинального улучшения экономичности ГТД на режимах ниже 40...50 %-ной мощности, которые достаточно характерны для эксплуатации внедорожных машин.

Расход топлива на режиме МГ. Этот параметр является наиболее уязвимым в части его влияния на путевой расход топлива машины. Режим МГ (или холостого хода) обычно выбирается с учетом минимизации расхода топлива и обеспечения высоких динамических характеристик двигателя. Необходимо, чтобы время приемистости турбокомпрессора (ТК) не превышало 4...5 с. Более глубокий дроссельный режим ТК может дать снижение часового расхода топлива при значительном ухудшении разгона ТК, который существенно затягивается на этих режимах.

Как показали результаты испытаний опытных двигателей ГТД-3Т, ГТД-700 [5], а также серийных двигателей ГТД-1000Т и ГТД-1250, часовой расход топлива на режиме МГ изменялся в пределах 22...30% расхода на режиме максимальной мощности. Если сравнить этот показатель с соответствующим параметром ТПД, то становится явным их существенное различие. Так, если у двигателя В-84М мощностью 617 кВт расход топлива на режиме МГ составляет 10 кг/ч (без загрузки генератора), у ГТД-1000Т мощностью 735 кВт — 70 кг/ч. На режиме МГ часовой расход топлива у данного ГТД соответствует расходу топлива ТПД В-84М на режиме более чем 40%-ной мощности.

Расчетный анализ показал, что если при длительном движении машин с этими двигателями доля режимов малого газа ориентировочно оценивается в 15%, соотношение их ПРТ составляет 1,6...1,8, то в условиях реальной эксплуатации (когда доля режимов малого газа достигает 40%) соотношение ПРТ достигает 1,90...2,10, а при доли режимов малого газа 70% соотношение ПРТ составляет 2,5...2,9.

В целях снижения ПРТ машин с ГТД, прежде всего в реальной эксплуатации, конструкторами ОАО “Спецмаш” и ЛНПО им. Климова были введены режим “стояночного малого газа” (СМГ), а также вспомогательный газотурбинный энергоагрегат ГТА-18 мощностью 18 кВт и система сброса топлива до режима МГ при торможении двигателем. Перевод на режим СМГ осуществляется при длительной стоянке машины с работающим двигателем, при этом часовой расход топлива составляет 50 кг/ч.

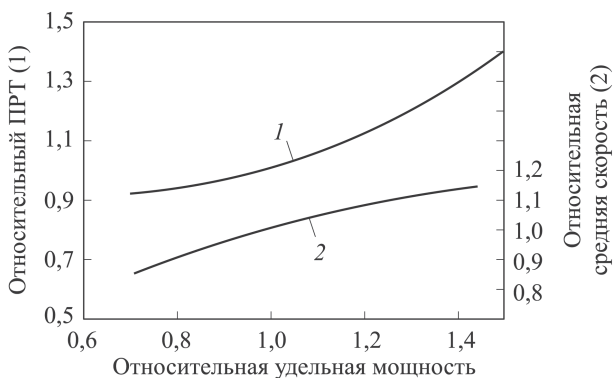
Эти мероприятия, по расчетной оценке, практически не оказывают влияние на ПРТ при марше, но в реальной войсковой эксплуатации машин снижают ее на 3...6%.

В Научно-исследовательском институте двигателей в 1980-е годы под руководством автора были проведены экспериментальные исследования путей снижения расхода топлива двигателя ГТД-1250 на режиме МГ и СМГ. Помимо специфичных для данного двигателя способов снижения расхода топлива (перевод генератора ГС-18 на второй каскад), были исследованы такие мероприятия, как раскрытие РСА силовой турбины во флюгерное положение, дросселирование входа,

воздушный распыл топлива (последнее оказалось достаточно эффективным в части повышения КПД сгорания) и др. Результаты испытаний показали возможность снижения расхода топлива на СМГ практически вдвое (без загрузки генератора). Однако даже в этом случае при реальной эксплуатации с относительной продолжительностью режима МГ в 40%, относительное значение ПРТ машины с ГТД-1250 по сравнению с машиной, оснащенной дизелем В-84М, окажется на уровне 1,55... 1,75.

Для проведенного анализа были использованы материалы сравнительных испытаний машин с двигателями В-84М и ГТД-1250, которые легли в основу подтверждения корректности методики сравнительной оценки. Для объективного сравнения путевой экономичности машин с ГТД и ТПД следует учесть влияние на ПРТ различия мощности рассмотренных двигателей. Результаты расчетного анализа влияния удельной мощности машины на ПРТ показаны на рисунке (расчеты проведены для условия движения по обобщенной трассе суточных маршей с максимально возможной скоростью). Двигатель ГТД-1250 имеет более высокие потери мощности от объектовых сопротивлений на входе и выходе по сравнению с двигателем В-84М (соответственно 14% и 8%), однако, в силовой установке с В-84М имеют место более высокие потери мощности в трансмиссии и затраты на привод вентилятора. Мощность моторно-трансмиссионной установки с двигателем В-84М в объектовых условиях на ведущем колесе, отнесенная к соответствующей мощности с двигателем ГТД-1250, составляет ~ 70%. Приведение к одной и той же мощности на ведущем колесе даст снижение указанных соотношений ПРТ на марше в размере ~ 10% (см. рисунок).

Таким образом, проведенный расчетный анализ показал, что увеличенный ПРТ транспортных машин с ГТД по сравнению с машинами с ТПД в значительной мере определяется повышенным расходом топлива при нагрузках менее 50% максимальной мощности и расходом



Изменение путевого расхода топлива (кривая 1) и средней скорости движения машины (кривая 2) по обобщенной трассе в зависимости от удельной мощности моторно-трансмиссионной установки с ГТД

топлива на режиме МГ. Если расчетный удельный расход топлива ГТД с теплообменником довести до уровня ТПД и обеспечить его постоянство при снижении мощности до 50 %, соотношение ПРТ машин с ГТД и ТПД в условиях длительного пробега окажется на уровне 1,15...1,20, а при реальной эксплуатации (работа на режиме МГ — 40 % времени) около 1,25...1,35. В этой расчетной оценке часовые расходы топлива на режимах МГ и СМГ приняты соответственно равными 40 и 20 кг/ч.

Поэтому в транспортных машинах с ГТД следует по возможности исключить работу двигателя при нагрузках ниже 40...50 % по мощности, а также на тормозных и стояночных режимах.

Практически единственным решением этой проблемы является применение накопителей энергии в силовых установках машин с ГТД. Подобные гибридные силовые установки в последние годы исследуют, прорабатывают и производят многие фирмы США, Японии, Германии, Швеции и других стран. Практически все разрабатываемые для армии США машины легкой категории по массе снабжаются накопителями энергии.

В зависимости от назначения газотурбинной силовой установки к накопителям энергии предъявляются различные требования по энергоемкости. Однако общими требованиями к накопителям энергии являются [6]:

- возможность запасать энергию с высоким КПД в течение требуемого времени;
- возможность отдавать энергию с высокой производительностью и эффективностью;
- возможность плавного управления потоком энергии при зарядке и разряде во всем диапазоне мощности от 1 до 100 %;
- выполнение в виде легкой, простой и компактной системы;
- обеспечение минимальных потерь энергии в накопителях энергии (не более 1 % за 5...10 мин).

Выбор типа накопителя энергии и его максимальной емкости определяется при разработке СУ с учетом показателей машины и характерной для ее назначения гистограммой режимов, а также других ограничений (габаритно-массовые показатели, стоимость и др.).

Среди разнообразных типов накопителей энергии в последнее время наиболее привлекательными считаются электрохимические (в том числе литий-ионные аккумуляторные батареи) и механические (маховики), в том числе магнетодинамические. В демонстрационном образце боевой машины пехоты (БМП) М2 “Бредли” в качестве накопителей энергии использованы свинцово-кислотные аккумуляторные батареи, в БМП “Мардер” — магнетодинамический накопитель фирмы Магнет Мотор (ФРГ).

Эффективность применения накопителей энергии подтверждают следующие расчеты. Расход топлива двигателя ГТД-1250 при работе на СМГ для обеспечения мощности, снимаемой с генератора, $N_r = 3$ кВт в течение 1 ч составляет 50 кг. Использование газотурбинного энергоагрегата типа ГТА-18 позволит снизить расход топлива до 10...12 кг/ч. Привод генератора мощностью 3 кВт от маховика, заряженного на максимальной мощности основного двигателя, с учетом всех потерь потребует расхода топлива 2,6 кг за 1 ч работы.

Расчеты, проведенные для машины массой 42 т, показали, что использование в качестве накопителя энергии маховика с максимальной энергией заряда 7,5 МДж позволяет при движении по типовой трассе снизить до 25 % ПРТ и повысить до 14 % среднюю скорость. При постоянстве средней скорости эффективность дополнительного снижения ПРТ составит около 20 %.

Заключение. 1. Использование газотурбинного двигателя в наземных транспортных машинах при всех его объективных преимуществах по сравнению с дизелем (по тяговым характеристикам, массогабаритным показателям, пуску при отрицательных температурах и др.) имеет практически непреодолимый недостаток — более высокий расход топлива на режимах МГ и при нагрузках ниже 30...50 % максимальной мощности.

2. При разработке наземных транспортных машин с ГТД обязательным элементом конструкции силовой установки должен быть накопитель энергии, используемый для энергоснабжения на стоянке и работе на неэффективных для двигателя глубоко дроссельных режимах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Морозов В.А., Изотов Д.С. Двигатели для “летающих танков” // Двигатель. 1999. № 5. С. 22–25.
2. Ашик М.В., Ефремов А.С., Попов Н.С. Танк, бросивший вызов времени (к 25-летию танка Т-80) // под общ. ред. Козишкурта В.И. СПб.: ГИПП “Искусство России”, 2001. 112 с.
3. Вавилонский Э.Б. А дизель все-таки лучше // Независимое военное обозрение. 2001. № 23.
4. Вавилонский Э.Б., Куракса О.А., Неволин В.Н. Ответ оппонентам (отклики на выступления и публикации в СМИ сторонников газотурбинного танка Т-80) // Техника и вооружение. 2008. № 2–8.
5. Павлов М.В., Павлов И.В. Отечественные бронированные машины // Техника и вооружение. 2008. № 5–9, 11, 12; 2009. № 1–5, 7–11; 2010. № 1–8.
6. Бут Д.А., Алиевский Б.Л., Мизюрин С.Р., Васюкевич П.В. Накопители энергии. М.: Энергоатомиздат, 1991. 399 с.

REFERENCES

- [1] Morozov V.A., Izotov D.S. Motors for “flying tanks”. *Dvigatel'* [Motor], 1999, no. 5, pp. 22–25 (in Russ.).

- [2] Ashik M.V., Efremov A.S., Popov N.S. Tank, broshivshiy vyzov vremeni (k 25-letiyu tanka T-80) [Tank defied time (for the 25th anniversary of the T-80)]. GIPP "Iskusstvo Rossii" Publ., 2001. 112 p.
- [3] Vavilonskiy E.B. A diesel engine is still better. *Nezavisimoe voennoe obozrenie* [Independent Military Review], 2001, no. 23 (in Russ.).
- [4] Vavilonskiy E.B., Kuraksa O.A., Nevolin V.N. Answer opponents (responses to speeches and media supporters of the gas turbine T-80). *Tekhnika i vooruzhenie* [Arms and equipment], 2008, no. 2–8 (in Russ.).
- [5] Pavlov M.V., Pavlov I.V. Fatherland armored vehicles. *Tekhnika i vooruzhenie* [Arms and equipment], 2008, no. 5–9, 11, 12; 2009, no. 1–5, 7–11; 2010, no. 1–8 (in Russ.).
- [6] But D.A., Alievskiy B.L., Mizyurin S.R., Vasyukevich P.V. Nakopiteli energii. [Energy storages]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 399 p.

Статья поступила в редакцию 16.09.2013

Троицкий Николай Иванович — канд. техн. наук, доцент кафедры "Газотурбинные двигатели и нетрадиционные источники энергии" МГТУ им. Н.Э. Баумана.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

N.I. Troitskii — Cand. Sci. (Eng.), assoc. professor of "Gas-Turbine Engines and Nontraditional Energy Sources" department of the Bauman Moscow State Technical University.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.