

УДК 629.113

Г.П. ПОДЗНОЕВ, У.А. АБДУЛГАЗИС

Крымский инженерно-педагогический университет, Симферополь, Украина

ОСОБЕННОСТИ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ЦИКЛА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ АВТОМОБИЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ГИДРИДА АЛЮМИНИЯ

Рассмотрены термодинамические особенности автомобильного варианта газо(паро)турбинного двигателя на основе алюмогидридного энергоносителя, пероксида водорода в качестве окислителя и регенерации теплоты. В систему включен теплообменник и конденсатор для регенерации теплоты с помощью оборотной воды. Вместо компрессора использована менее энергоемкая подача воды в гидролизный генератор водорода и пероксида водорода в камеру сгорания с помощью питательных насосов. Путем математического моделирования для вариантов кватной подачи в процесс оборотной воды определены основные термодинамические характеристики – температура, давление, энтальпия пара в точках смены процессов, термический КПД и совершаемая работа. Установлено существенное увеличение значений давления, термического КПД и совершаемой полезной работы цикла при увеличении количества оборотной воды на фоне снижения термических нагрузок в камере сгорания.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, альтернативный энергоноситель, гидрид алюминия, термодинамика, гидролиз, регенерация теплоты, соотношение параметров

Постановка проблемы

Основной проблемой, стоящей в настоящее время перед автомобильным сектором экономики является диверсификация системы его энергетического обеспечения вследствие неуклонного истощения природных запасов углеводородного топлива и его негативного воздействия на экологию окружающей среды и жизнеобеспечения человека. К этому следует добавить низкий коэффициент полезного использования теплоты сгорания углеводородного топлива в существующих типах автомобильных ДВС. В то же время не все потенциальные возможности реализуются в плане использования новых энергоносителей в существующих типах конструкций двигателей. К последним можно отнести и газотурбинные двигатели (ГТД), обладающие рядом принципиальных преимуществ перед поршневыми ДВС.

Информационно-аналитический обзор

Простейший газотурбинный двигатель имеет одну турбину, которая питает компрессор и одновременно является источником полезной мощности. Многовальный ГТД имеет несколько последовательно или параллельно стоящих турбин, каждая из которых имеет свой вал.

Как правило, первая после камеры сгорания турбина приводит компрессор двигателя, а последующие могут приводить как полезную нагрузку,

так и дополнительные компрессоры самого двигателя.

Общепризнанными преимуществами ГТД являются следующие [1];

– в конструкции турбины всего около 60 движущихся частей, а в обычном поршневом двигателе адекватной мощности их более 300. Масса и габариты ГТД не превышает 25-30% массы поршневого двигателя соответствующей мощности;

– режим горения у ГТД непрерывный, давление невысокое, что обеспечивает спокойную работу двигателя на любых числах оборотов и существенно упрощает систему регулировки подачи топлива. Отсутствие крутильных колебаний благоприятно сказывается на работе трансмиссии;

– для пуска двигателя при низкой температуре воздуха не требуется разогрев масла. Подача масла на подшипники при соответствующей его вязкости обеспечивается при любой температуре атмосферного воздуха. Также в десятки раз снижается расход масла, поскольку в ГТУ меньше подшипников, отсутствуют трущиеся детали и исключен непосредственный контакт между маслом и горячим газом;

– не имеет большого значения выбор топлива. Можно применять керосин, лигроин, дизельное топливо, бензин, сжатые и сжиженные газы (в том числе и водород) и их смеси;

– мощность в одном агрегате может быть поднята практически до любой необходимой величины при вполне приемлемых размерах и массе;

– повышение мощности при низких температурах положительно сказывается на работе в холодное время года;

– мощность в одном агрегате может быть поднята практически до любой необходимой величины при вполне приемлемых размерах и массе;

– наибольший момент соответствует заторможенному положению ротора силовой турбины при трогании машины с места, что позволяет в несколько раз сократить число передач в трансмиссии, а в ряде случаев для легковых автомобилей полностью исключить коробку передач и сцепление, что заметно облегчает управление автомобилем.

Однако наряду с существенными достоинствами ГТД имеют и ряд недостатков [2].

– низкий КПД, обусловленный меньшим тепловым перепадом при адиабатном расширении, так как допустимая по условиям прочности материалов максимальная температура газов перед турбиной компрессора ГТД составляет 1200-1450 К, в сравнении с 2800 К в поршневом двигателе;

– в транспортных ГТД компрессор потребляет мощность почти вдвое большую полезной мощности, снимаемой с вала турбины, а расход воздуха в 3-4 раза больше, чем для дизеля;

Кроме этого разработанные газотурбинные двигатели рассчитаны на использование углеводородного топлива, что в целом уравнивает их с поршневыми по влиянию на экологию и тепловой баланс природной среды.

Стремление реализовать преимущества ГТД способствовало активной разработке экспериментальных газотурбинных автомобилей различными фирмами [3]. Американская фирма Дженерал Моторс разработала работающий на керосине газотурбинный двигатель XP-21 с эффективной мощностью 272 кВт, при скорости вращения вала компрессора 26 000 мин⁻¹, а тяговой турбины - от 0 до 13000 мин⁻¹. Фирма Крайслер (США) создала легковой автомобиль «Плимут» с газотурбинным двигателем мощностью 88,3 кВт и расходом 15,9 л топлива на 100 км пробега.

Фирма Фиат сконструировала газотурбинный автомобиль мощностью 135 кВт, развивающий скорость до 240 км/час. Фирма «Ровер» подготовила экспериментальный автомобиль с ГТД мощностью 88,3 кВт и теплообменником. Вал компрессора двигателя вращается со скоростью 50000 мин⁻¹, а вал тяговой турбины — до 30000 мин⁻¹.

На Горьковском автомобильном заводе [4] с 1955 года была разработана модель двигателя ГАЗ-99Д мощностью 187 кВт и ГАЗ-99 ДМ со степенью повышения давления до 6 и температурой газов до 1300 К при удельном расходе топлива не более 170 г/л.с.ч.

В то же время как поршневые, так и газотурбинные двигатели потребляют углеводородное топливо, следовательно, остается зависимость от неуклонно истощающихся природных ресурсов углеводородов и выбросов в атмосферу CO₂.

Наиболее перспективным альтернативным топливом в настоящее время признан водород, ресурсы которого практически неисчерпаемы и могут быть возобновлены в любом требуемом объеме. По данным интернет-сайтов [4,5] практически все энергетические корпорации вкладывают огромные средства в престижные водородные программы.

Как топливо, водород в разработанных на настоящий момент концепт-автомобилях используется в двух принципиально различных вариантах:

– в топливных элементах, вырабатывающих электроэнергию для питания электродвигателей;

– непосредственно в двигателях внутреннего сгорания карбюраторного типа.

В последнем случае (BMW 750hL) преимущество состоит в том, что двигатели могут работать на любом из двух видов топлива – и на бензине, и на водороде. Подобный вариант использовала также фирма «Ford», установив на модели Focus C-MAX 2,3-литровый четырехцилиндровый (82 кВт) бензиновый двигатель. Сжатый водород размещался под давлением 35 МПа в трех баках общим объемом 119 литров (2,75 кг), что позволяло автомобилю пройти всего 200 км.

Более эффективными считаются водородные системы с топливными элементами (ТЭ) к которым относятся модели Honda Civic FCX и DM Hy-Wire, с водородом в специальных сверхпрочных баллонах объемом 150–160 дм³ под давлением 35 МПа. Масса H₂ при этом составляет всего 4,5–4,9 кг (570 МДж), достаточных на 400-450 км пробега.

В то же время водород обладает весьма серьезными проблемными характеристиками, трудно разрешимыми в разработанных концепциях водородных автомобилей. Он имеет весьма низкую объемную энергоемкость (10,8 МДж/м³ по сравнению с 36000 МДж/м³ для бензина) и плотность (0,099 кг/м³ при 273 К). Поэтому для его хранения и перевозки приходится использовать очень высокое давление (более 30 МПа) или в жидком виде при весьма низких температурах, что требует также прочной и надежной тары. Кроме этого его наличие под сиденьем сжатым до 35 МПа (4 – 5 кг) со взрывным потенциалом около 90 кг в тротиловом эквиваленте, создает серьезные технологические и психологические проблемы при использовании в автомобиле в современном весьма неуравновешенном мире.

Более перспективным является использование ряда комплексных металлгидридов, особенно на основе гидроксида алюминия (AlH₃), в условном адек-

ватном объеме которого (например, 150 дм³) содержится 22,2 кг водорода с энергопотенцией около 2665 МДж [6]. Наибольший энергосвыход получается при гидролизе AlH₃. В этом случае из его указанного объема можно получить 44,4 кг газообразного H₂ с энергопотенцией уже 5330 МДж, что выше таковой для 150 дм³ бензина (5060 МДж).

Кроме этого при гидролизе выделяется значительное количество тепловой энергии (13,2 МДж/кг AlH₃, или около 2918 МДж в варианте 150 дм³ AlH₃). Таким образом, полный энергопотенциал AlH₃ может достигать 8250 МДж, что в 1,6 раза выше адекватного по объему бензина или в 15,3 раза выше, чем для сжатого до 35 МПа водорода.

В работе [8] теоретически рассмотрен идеальный термодинамический цикл Дизеля (H-Дизель) с предварительным гидролизом AlH₃ оборотной водой и регенерацией теплоты отработавших газов в дополнительном теплообменнике. Математическое моделирование основных термодинамических характеристик подобного цикла H-Дизеля показало [7] значительное увеличение термического КПД и количества полезной работы при адекватности вводимой теплоты, но с более мягкими параметрами рабочего тела.

Цель исследований

Целью работы является попытка рассмотреть и обосновать возможность использования алюмогидрида алюминия, пероксида водорода и регенерации теплоты в ГТД.

В задачу исследований входило математическое моделирование термодинамических характеристик идеального газотурбинного цикла. Также оценивалась зависимость рассчитанных значений параметров (температуры и давления), энтальпии пара (h), термического КПД (η), и совершаемой работы (A) от квоты добавочной воды и энергетического баланса цикла. Последний складывался из теплоты гидролиза AlH₃, парциально приходящейся на получаемую паро-водородную фазу, теплоты сгорания водорода, теплоты термической диссоциации пероксида водорода (H₂O₂) в камере сгорания и количества регенерируемой теплоты.

Изложение материала

Аналогично рассмотренным вариантам H-Дизеля может быть построена работа и ГТУ с дополнительно пристроенным гидролизным генератором водорода, теплообменником и конденсатором. Для снижения затрат на компрессию воздуха предусмотрено

использование жидкого пероксида водорода (H₂O₂) в качестве окислителя, массовое содержание активного O₂ в котором составляет 47%, что значительно выше такового для воздуха (около 23%). При высокой температуре пероксид разлагается на кислород и воду (H₂O₂ + Q → H₂O + O₂). При этом выделяется еще 2,9 МДж/кг (около 13% дополнительной теплоты). При термическом разложении пероксида получается in situ кислород в атомарной форме, что значительно улучшает кинетику и полноту горения основного топлива. Для подачи жидкого пероксида в камеру сгорания требуются почти на порядок меньшие энергозатраты в сравнении с компрессией воздуха.

Термодинамические расчеты параметров идеального газотурбинного цикла на данном этапе проводились с кватным изменением массы вводимой оборотной воды при равенстве количества регенерируемой теплоты.

За основу математического моделирования были приняты:

- объем камеры гидролиза – 1,0 дм³;
- объем камеры сгорания 1,5 дм³;
- количество ступеней турбины – 1.

Условная квота расхода энергоносителя (AlH₃), равная 0,045 г за один термодинамический цикл. Из указанной пропорции до 17,5 % теплоты в цикл вводится за счет гидролиза AlH₃, до 38 % - регенерируемая теплота, около 13 % составляет теплота термической диссоциации пероксида водорода и всего около 32 % - при сгорании водорода. Особенностью рассматриваемого термодинамического цикла является то, что после гидролиза образуется паро-водородная смесь, подаваемая в камеру сгорания по перепаду давления, а после сгорания рабочим телом становится монокомпонентная фаза водяного пара, которая и выполняет работу в процессе адиабатного расширения.

При расчете термодинамических параметров температура исходных компонентов перед гидролизом принималась равной 373 К, условно адекватная температуре водной фазы при конденсации отработавшего пара в конденсаторе. Конденсат подавался питательным насосом в теплообменник с отбором теплоты (одинаковой для всех рассчитанных вариантов) от отработавшего пара и далее поступал в гидролизную камеру. Варианты квоты исходной добавочной воды на гидролиз рассчитывались в интервале 2, 0 – 4,0 г на цикл с шагом в 0,5 г. Моделирование проводилось по стандартной методике теплотехнических расчетов термодинамических процессов, составляющих идеальный паротурбинный цикл (табл. 1).

Таблица 1

Соотношение параметров термодинамического цикла газотурбинного (паротурбинного) цикла от квоты добавочной воды при использовании алюмогидрида, пероксида водорода и регенерации теплоты

Варианты	1	2	3	4	5
H ₂ O	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
t ₂	830,3	745,0	686,4	644,5	612,9
t ₃	1170,7	1026,3	926,0	853,1	797,6
t ₄	726,2	620,7	547,2	513,9	480,1
p ₂	7,86	8,79	9,7	10,6	11,54
p ₃	7,7	8,36	9,0	9,2	10,2
h ₃	24,64	31,36	38,03	44,70	51,39
h ₄	26,66	33,70	40,43	47,18	54,00
h ₅	28,25	34,89	41,55	48,21	54,87
η	0,560	0,664	0,679	0,706	0,751
A	1894,3	2250,8	2305,2	2388,9	2551,6

В табл. 1 даны: H₂O – квота воды в циклическом обороте (z); t₂ – температура паро-водородной фазы в конце гидролиза (К); t₃ – температура паровой фазы в конце сгорания; t₄ – температура в конце адиабатного расширения (К); p₂ – давление паро-водородной фазы после гидролиза (10⁵ Па); p₃ – давление паровой фазы после изобарного сгорания (10⁵ Па); p₄ – давление паровой фазы после адиабатного расширения (10⁵ Па); h₃ – энтальпия водяного пара в конце изобарного сгорания (кДж); h₄ – энтальпия водяного пара в конце адиабатного расширения (кДж); h₅ – энтальпия водяного пара в конденсаторе (кДж); η – термический КПД цикла; A – работа цикла (Дж).

Из проведенного квотного моделирования видно, что:

1. Рассмотренный вариант представляет собой бинарный газо-паротурбинный двигатель (ГПТД), где в гидролизной камере образуется паро-водородная газовая фаза, без каких либо потерь поступающая в камеру сгорания. В последней в процессе сгорания водорода образуется паровая фаза, выполняющая роль рабочего тела.

2. По мере повышения количества воды, участвующей в термодинамическом процессе (расход пара) и равенстве регенерируемой теплоты закономерно возрастает давление паровой фазы и энтальпия водяного пара. Адекватно этому увеличивается КПД цикла и совершаемая работа.

3. Температурные показатели в термодинамической системе по мере увеличения количества задействованной воды постепенно снижаются, что благоприятствует работе лопаток турбины.

Выводы

Установленные параметрические зависимости термодинамического цикла двигателя газо(паро)-турбинной установки (ГПТД) с использованием гидроксида алюминия в качестве основного энергоносителя, пероксида водорода как окислителя вместо воздуха, конденсацией отработавшего водяного пара и регенерацией теплоты оборотной водой свидетельствуют о

возможности существенного улучшения экологических и параметрических характеристик предлагаемого варианта ГПТД, сохраняя свои достоинства и освобождаясь от отмеченных выше недостатков. Использование пероксида водорода в качестве окислителя вместо воздуха позволяет исключить из схемы компрессор, сохраняя тем самым значительную часть энергии рабочего тела на совершение основной полезной работы – получение электроэнергии.

При дальнейших исследованиях необходимо оптимизировать термодинамический цикл по основным технологическим характеристикам – количеству регенерируемой теплоты, соотношению размеров камер гидролиза и сгорания, температуре и давлению с целью получения максимальной работы турбины, повышения ее эксплуатационной эффективности и экологичности.

Литература

1. Достоинства газотурбинных двигателей: Эволюция автомобилей [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: avto-evolution.ru/dostoinstva-gazoturbinnux-dvigatелеj.

2. Недостатки газотурбинных двигателей: Эволюция автомобилей [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: avto-evolution.ru/nedostatki-gazoturbinnux-dvigatелеj.

3. Автомобильные газотурбинные двигатели. Журнал «АВТОТРАК» [Электронный ресурс]. – Ре-

режим доступа к журналу: www.autotruck-press.ru/.../article196.

4. Интернет-журнал «Мир автоновостей» Водородные Focus готовят к запуску в серию [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://auto-show-info.ru/?m=200812135>.

5. Подзноев Г.П. Метало гидридные системы энергообеспечения транспорта / Г.П. Подзноев, У.А. Абдулгасис // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2004. – № 8 (16). – С. 32-36.

6. Подзноев Г.П. Термодинамические особенности регенеративного цикла H-дизеля с использованием энергоносителя на основе гидрида алюминия. / Г.П. Подзноев, У.А. Абдулгасис // *Двигатели внутреннего сгорания*. – 2008. – № 2. – С. 13-17.

7. Подзноев Г.П. Возможности использования пероксида водорода в качестве окислителя в двигателях внутреннего сгорания / Г.П. Подзноев, У.А. Абдулгасис // *Ученые записки КИПУ*. – Симферополь. – 2009. – Вып. 20. – С. 15-21.

Поступила в редакцию 31.05.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой механизации, энергетики и технического сервиса Л.Ф. Бабицкий, Национальный аграрный университет, Симферополь.

ОСОБЛИВОСТІ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ТЕРМОДИНАМІЧНОГО ЦИКЛУ ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА АВТОМОБІЛЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕНЕРГОНОСІЯ НА ОСНОВІ ГІДРИДУ АЛЮМІНІЮ

Г.П. Подзноев, У.А. Абдулгасис

Розглянуто термодинамічні особливості автомобільного варіанту газо(паро)турбінного двигуна на основі алюмогидридного енергоносія, пероксиду водню в якості окислювача і регенерації теплоти. До системи включений теплообмінник і конденсатор для регенерації теплоти за допомогою зворотної води. Замість компресора використана менш енергоємна подача води в гідролізний генератор водню і пероксиду водню в камеру згорання за допомогою живильних насосів. Шляхом математичного моделювання для варіантів квотної подачі в процес оборотної води визначені основні термодинамічні характеристики – температура, тиск, ентальпія пара в точках зміни процесів, термічний ККД і чинена робота. Встановлено істотне збільшення значень тиску, термічного ККД і зробленої корисної роботи циклу при збільшенні кількості оборотної води на тлі зниження термічних навантажень в камері згорання.

Ключові слова: газотурбінний двигун, альтернативний енергоносії, гідрид алюмінію, гідроліз, регенерація теплоти, співвідношення параметрів.

THE OPTIMIZATION OF PARAMETRIC CHARACTERISTICS OF H-DIESEL THERMODYNAMIC REGENERATION CYCLE WITH USAGE OF AN ENERGY CARRIER BASED ON HYDRIDE ALUMINIUM

G.P. Podznoev, U.A. Abdulgazis

Thermodynamic peculiarities gas-turbine engine on the basis of aluminum hydride energy carrier, peroxide hydrogen, as an oxidizer and heat regenerator are considered herein. There is heat changer and condensator for heat regeneration with the help of recycled water in the system. Instead of compressor there is less energy consuming in put of water into hydrolyzed generator of hydrogen and peroxide of hydrogen into the combustion chamber with the help of pumps. By means of mathematical modeling the variants of quote input in to the process of recycled water main thermodynamics: temperature, pressure, enthalpy of vapour in the points of process changes thermal ILU and the work being done, are defined herein.

Key words: gas-turbine engine, alternative energy carrier, aluminum hydride, H-Diesel, thermodynamic, hydrolyze, heat regeneration, correlation of parameters.

Подзноев Геннадий Петрович – канд. геол.-мин. наук, доцент, доцент каф. «Эксплуатация и ремонта автомобилей» Крымского инженерно-педагогического университета, Симферополь, Украина, e-mail: podznoev_gp@hotmail.com

Абдулгасис Умер Абдуллаевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий каф. «Эксплуатация и ремонт автомобилей» Крымского инженерно-педагогического университета, Симферополь, Украина e-mail: cseru@ukr.net.