

УДК. 629.113

Г.П. Подзноев, канд. геол.-мин. наук, У.А. Абдулгалис, д-р техн. наук

ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ЦИКЛА ДИЗЕЛЯ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛЬТЕРНАТИВНОГО ЭНЕРГОНОСИТЕЛЯ

Введение

В последнее время все чаще дискутируется проблема альтернативной энергетики, особенно в транспортной сфере экономики – ее автомобильном, железнодорожном и водотранспортном секторах. Причиной этому является осознание с одной стороны конечности земных запасов традиционного углеводородного топлива, а с другой – серьезных сдвигов системы планетарного теплового баланса вследствие перенасыщения атмосферы продуктами сгорания углеводородов и угрожающего ухудшения экологической составляющей окружающей среды обитания человека.

1. Формулирование проблемы

Поиск альтернативных энергоносителей ведется в самых различных направлениях. Особенно широко пропагандируются этанол и так называемый «биодизель», с достаточно отработанной технологией их производства, но, по сути своей, являющимися теми же самыми углеводородами со всеми присущими им проблемами. Кроме того, следует учитывать также необходимость существенной реструктуризации агросектора, итак с трудом справляющегося с насущными запросами жизнеобеспечения продуктами питания. Из этого следует, что отмеченное направление не является универсальным и не решает проблемы в целом.

Более перспективен путь использования в качестве энергоносителя водорода [5,6,7], ресурсы которого практически неисчерпаемы и могут быть возобновлены, поскольку продуктом его сгорания

является исходная вода. То есть, мы получаем близкий к идеальному и наиболее рациональный замкнутый цикл, не нарушающий природный материальный и энергетический баланс

По удельной теплоте сгорания водород превосходит бензин почти в 2,5 раза (120 МДж/кг против 45-46 МДж/кг) [1]. Он имеет значительно более широкий диапазон пределов воспламенения (4,0-75,0 % против 1,5-7,6 % об.) и более высокую скорость сгорания водородно-воздушных смесей, что существенно улучшает кинетику горения и повышает термический КПД термодинамического цикла ДВС при меньшей степени нагрева двигателя. Не менее важным является практически полное исключение вредных выбросов в атмосферу и полная конструктивная совместимость углеводородных и водородных систем обеспечения работы ДВС.

Однако, для всех вариантов двигателей на водородном горючем самой серьезной проблемой является сам водород ввиду его весьма низкой плотности (0,09 г/дм³). В известных моделях концептуальных автомобилей Honda-FCX и Hy-Wire [2,3] водород предлагается содержать в специальных баллонах общим объемом 150 – 160 дм³ (3 по 50 дм³ или 2 по 78 дм³) под давлением 35 МПа. Масса хранимого газа при этом составляет всего 4,5 – 4,9 кг или 3,8 МДж/м³ топливной емкости, что обеспечивает лишь около 400 км пробега автомобиля на одной заправке. Для сравнения, адекватный объем бензина (150 м³) при энергопотенции 5062 МДж или 33,75 МДж/м³ и расходе 10 литров на 100 км позволил бы автомобилю пройти 1500 км.

Кроме этого здесь возникает ряд сложнейших проблем, связанных с безопасностью эксплуатации сжатого до 35 МПа водорода, его низким энергозапасом в автомобиле (4,7 кг H₂ или 570 МДж) и необходимостью практически с нуля создавать всю производственную и сервисную инфраструктуру автомобилестроения параллельно существующей.

Еще более проблематична система использования жидкого водорода в части сложности его производства, транспортировки, заправки, хранения и эксплуатации в автомобилях.

2. Решение проблемы

Одним из наиболее перспективных путей решения проблемы хранения водорода может стать использование ряда гидридов металлов, стабильных в пределах обычных температур их возможной эксплуатации в автомобилях (от 0 до +200⁰ С) [1]. Наиболее интересен в этом отношении гидрид алюминия (AlH₃) [8,9,10,11,12]. Например, в том же условном объеме 150 дм³ топливной емкости алюмогидрида содержится 22,2 кг водорода или 17,76 МДж/м³ объема гидрида, в то время как в таком же объеме жидкого H₂ – всего 10,8 кг.

Водород из гидрида алюминия можно извлечь двумя способами:

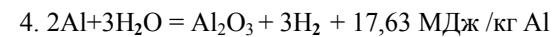
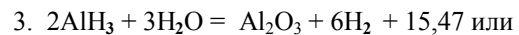
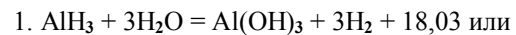
1. Диссоциацией по схеме:



Процесс диссоциации металлогидридов эндотермичен, поэтому для извлечения водорода этим способом необходим предварительный нагрев гидрида до определенной пороговой температуры, существенно индивидуальной для каждого металлогидрида. С прекращением подвода тепла выделение водорода также прекращается, что весьма удобно для регулирования подачи водорода путем дозированного нагрева гидридной массы. Модифицируя гидрид алюминия добавками переходных металлов или РЗЭ с известными каталитическими и стабилизирующими

свойствами, можно придать ему композитную структуру интерметаллического сплава, обладающего способностью к многократной регенерации, что может позволить существенно расширить и улучшить эксплуатационные качества этого весьма интересного и перспективного металлогидрида как высокоэффективного, удобного и экологически безопасного аккумулятора водорода.

2. Гидролизом по схеме:



Количество получаемого при этом водорода удваивается по сравнению с его содержанием в исходном гидриде. То есть, из первоначального объема в 150 дм³ гидрида алюминия гидролизом можно получить уже 44,4 кг газообразного водорода с энергопотенцией 5372 МДж, что уже выше таковой для 150 дм³ бензина (5062 МДж). Кроме этого, при гидролизе выделяется значительное количество тепловой энергии (15,5 - 18 МДж/кг AlH₃ или около 3700 МДж в варианте 150 дм³ AlH₃). Таким образом, полный теоретический энергопотенциал AlH₃ может достигать 9000 МДж, что более чем в 1,8 раза выше адекватного по объему бензина или в 15,8 раза выше, чем в случае сжатого до 35 МПа водорода. Приведенные расчеты свидетельствуют о несомненных перспективах AlH₃ как потенциального энергоносителя в сравнении с углеводородным топливом или газообразным H₂. Масса контейнера AlH₃ объемом 150 дм³ в этом случае будет находиться в пределах 220-225 кг, что можно считать вполне приемлемым для автомобиля.

Гидрид алюминия удобен также и тем, что он достаточно стабилен в интервале от -50 до + 90⁰С, взрывобезопасен и не токсичен. Его диссоциация начинается при атмосферном давлении с темпера-

туры, близкой к 100°C , легко достижимой за счет использования тепла отходящих паров воды, а гидролиз протекает бурно уже при стандартных условиях. Другой весьма важной особенностью металлгидридных систем хранения водорода в металлической матрице – их высокая безопасность в эксплуатации и при долговременном хранении. Разгерметизация гидридного контейнера не приведет к утечке водорода из системы и, тем более, к взрыву, поскольку водород находится при этом в связанном виде. Частичное выделение водорода из гидрида, вследствие своего эндотермического характера, вызовет адекватное поглощение тепла из окружающей среды и охлаждение гидридной системы с ее возвратом в стабильное равновесное состояние.

Металлогидридные системы аккумуляции водорода не требуют затрат на высокую компрессию или сжижение водорода. Их транспортировка и хранение возможны без особых мер техники безопасности и высокой квалификации персонала [1].

И, наконец, отработанная алюминиевая матрица после гидролиза может быть возвращена на базовый технологический комплекс для регенерации алюминия или его гидрида, то есть, не является расходуемой, а выполняет роль постоянно циркулирующего компонента между генерирующей и потребляющей энергосистемами.

Учитывая вышесказанное, представляется целесообразным рассмотреть термодинамическую, техническую и технологическую возможность использования алюминия или его гидрида для энергообеспечения двигателей внутреннего сгорания (ДВС) в варианте гидролизной схемы, как обладающей наибольшей энергopotенцией.

Поскольку при гидролизе, помимо газовой, образуется также и твердая фаза, необходимо стадию гидролиза конструктивно сформировать в виде отдельного блока (H-генератора) между исходным контейнером с AlH_3 и рабочим блоком цилиндров

ДВС для предварительного разделения потоков газовой и твердой фаз. Для этого может быть использован принцип вихревого конического циклона с последующей доочисткой газовой фазы с помощью термостойкого фильтра. Тепловая энергия, выделяющаяся при гидролизе в условиях изохорного процесса, распределяется между водородом и оксидом алюминия адекватно их массовым количествам и в соответствии со значениями их теплоемкостей (c_p). При этом, на долю газовой фазы (водорода) приходится около 60 % выделяющейся теплоты с весьма высоким термическим потенциалом (около 3600°K). Для повышения теплового баланса газовой фазы и снижения термического потенциала до технологически более эффективных значений в систему необходимо ввести дополнительный поглотитель теплоты, роль которого может выполнять добавочная вода, подаваемая на гидролиз и легко образующая дополнительный объем паровой фазы. При этом существенно снижается температура паро-газовой фазы, повышается ее теплосодержание и возрастает давление, что увеличивает эффективность последующих процессов сжатия, сгорания и расширения. В этом случае на стадию адиабатного сжатия поступает высокотемпературная паро-водородная смесь под повышенным давлением, которая, по сути своей, является топливной смесью. После ее сжатия в камеру сгорания подается сжатый воздух или кислород и происходит сгорание водорода с последующим адиабатным расширением, аналогичных циклу Дизеля. Рабочим телом при этом будет являться водяной пар (60-80 % по массе) с примесью азота воздуха (20-40 %). Резкое преобладание в отходящих газах водяного пара позволяет дополнить традиционный термодинамический цикл Дизеля схемой с регенерацией (возвратом) части теплоты отходящей парогазовой фазы и передачей ее воде, поступающей на стадию гидролиза. Для этого в схему добавляется теплообменник-конденсатор, через который во

встречных направлениях проходят, с одной стороны, отработанная высокотемпературная паро-газовая смесь, а с другой – обратный водяной конденсат, полученный из охлажденной паро-газовой смеси. Выделенный водяной конденсат с температурой 95-100⁰С подается водяным насосом по теплообменнику и забирает часть теплоты от отходящих продуктов сгорания. Азот из последних удаляется на стадии конденсации пара.

Концептуальная схема подобного термодинамического цикла ДВС (Н-дизеля) представляет собой систему (рис. 1), включающую в себя: 1-2 изохорный процесс гидролиза алюмогидрида в объеме Н-генератора; 2-3 адиабатное сжатие паро-водородной смеси в цилиндре двигателя; 3-4 подача сжатого воздуха в камеру сгорания и изобарное сгорание водород-содержащей фазы; 4-5 адиабатное расширение и выполнение работы; 5-6 изохорный процесс передачи в теплообменнике части теплоты конденсату (регенерация, q_r); 6-7 конденсация пара и его возврат в процесс; 7-8 процесс нагнетания конденсата в теплообменник водяным насосом; 8-9 нагрев конденсата в теплообменнике до температуры кипения; 9-10 процесс парообразования; 10-1 перегрев пара перед Н-генератором.

Оценку эксплуатационной и экономической составляющей подобного цикла Н-дизеля можно спрогнозировать по сопоставлению удельных энергетических затрат. Исходя из условного объема топливной емкости в 50 дм³, масса дизтоплива при его усредненной плотности 0,84 кг/дм³ составит в этом случае 42 кг, а теплотворная способность по низшей теплоте сгорания – 1790 МДж. При условно принятом усредненном расходе топлива 10 дм³ на 100 км, указанного энергопотенциала достаточно для пробега автомобилем 500 км. Удельные энергозатраты при этом составят 3,58 МДж/км.

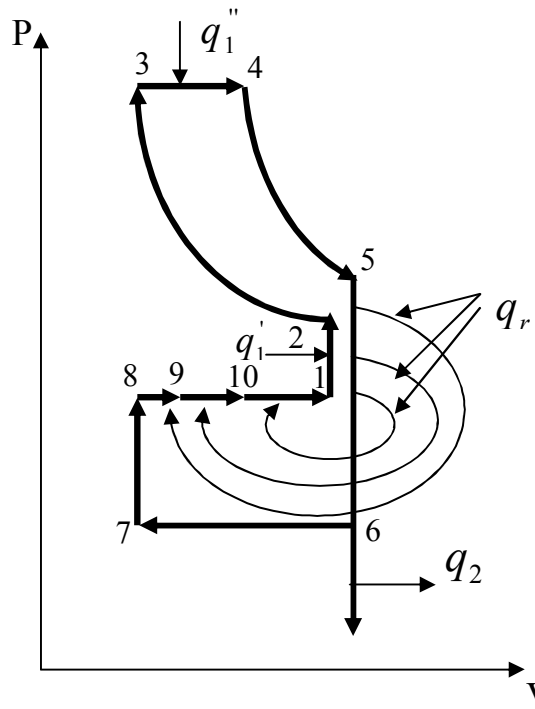


Рис. 1. Схема термодинамического цикла ДВС (Н-дизеля)

Такого же объема емкость с гидридом алюминия имеет массу 72,5 кг и обладает потенциальной удельной теплотворной способностью около 2910 МДж, что обеспечит пробег при адекватных удельных энергозатратах около 815 км при идентичности термодинамики сравниваемых циклов.

В то же время, в рассматриваемом здесь цикле Н-дизеля часть тепловой энергии после совершения работы возвращается в процесс, повышая тем самым термический КПД цикла и выполняемую работу адекватно степени регенерации теплоты. Если же не менять количество выполняемой работы, то для ее совершения в том же объеме потребуется меньшее количество топлива. Предварительные расчеты показывают, что при регенерации 30 % отходящей теплоты (q_r), при дополнительном количестве вводимой в процесс теплоты (q_1), необходимой для выполнения адекватной работы, расход энергоносителя снижается примерно на 15-20 %. То есть, для пробега 850 км достаточно не 72,5 кг AlH_3 , а всего 50 кг, или же

возможно увеличить пробег до 1230 км при прежнем объеме AlH_3 , то есть, - 50 дм^3 .

Еще более значима разница при сравнении Н-дизеля с концепт-автомобилями на топливных элементах и сжатым до 35 МПа водородом в емкости 150 дм^3 . Запас энергоносителя при этом обеспечивает всего 400 км пробега. В варианте Н-дизеля топливная емкость, адекватная 150 дм^3 AlH_3 будет иметь массу 230 кг с общей энергопотенцией более 9000 МДж, что обеспечит пробег уже около 3700 км. С учетом же фактора сохранения существующей инфраструктуры автомобильного производства и сервиса, перспективы предлагаемого типа Н-дизеля значительно предпочтительнее варианта на сжатом водороде даже с топливными элементами.

Что касается сырьевой базы AlH_3 , то, в отличие от таковой для производства топливных элементов с использованием дорогих и сравнительно редких металлов (Ni, Co, Pd и др.) с ограниченными природными запасами, Al является одним из наиболее распространенных металлов земной коры (8,8 %). К тому же разработана и предложена к внедрению эффективная технология получения порошкового Al и его гидрида.

Заключение

Как следует из вышесказанного, предлагаемый термодинамический цикл Н-дизеля с использованием AlH_3 (или порошка Al) в качестве энергоносителя, имеет рядом существенных особенностей:

1. В максимальном объеме используется энергопотенциал металлгидрида вначале при его гидролизе, а затем при сгорании полученного водорода.
2. Изохорное повышение давления проводится в Н-генераторе и переходит в цилиндр перед адиабатным сжатием за счет тепловой энергии гидролиза;
3. Адиабатно сжимается паро-водородная смесь, а не воздух или природный газ.

4. В камеру сгорания подается не топливо, а окислитель (сжатый воздух или кислород);

5. Рабочим телом является водяной пар в варианте с кислородом или с примесью азота в случае подачи в камеру сгорания воздуха;

6. Существенное преобладание пара в продуктах сгорания дает возможность регенерировать часть отходящей тепловой энергии и вернуть в оборот воду в качестве циркулирующего теплоносителя, что позволит существенно повысить КПД Н-дизеля и в значительной степени приблизить его к таковому для регенеративного цикла Карно;

7. Техническая реализация предлагаемого варианта цикла Дизеля позволит сохранить практически без существенных изменений традиционную конструкцию дизеля и использовать, тем самым, всю существующую к настоящему времени инфраструктуру производства и сервисного обслуживания дизельных двигателей.

Список литературы:

1. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение. Справочник. (Д.Ю. Гамбург, В.П. Семенов, Н.Ф. Дубовкин, Л.Н. Смирнова). М. Химия, 1989.
2. Фомин А. Водородный фундамент. Ж. За рулем. 2004. № 1. с. 64 – 67.
3. Орлов Д. Теплота спасет мир. Ж. Вокруг Света. 2003. № 2. с. 67 – 73.
4. Мищенко А.И. Применение водорода для автомобильных двигателей. Киев. Наукова думка. 1984. 150 с.
5. Подгорный А.Н., Варшавский И.Л., Макаров А. А., Мищенко А.И. Проблемы машиностроения. 1976. № 5 с. 12 – 15.
6. Комплексы металлоорганических, гидридных и галоидных соединений алюминия. М. Наука, 1970.
7. Маккей А. Водородные соединения металлов. М. Мир, 1968 г.
8. Жигач А.Ф., Стасиневич Д.С. Химия гидридов. Л. Химия, Ленинградское отд., 1969.
9. Антонова М.М. Свойства гидридов. Справочник. Киев, Наукова Думка. 1975.
10. Подзноев Г.П. Абдулгазис У.А. Металлогидридные системы энергообеспечения транспорта. Сб. «Авиационно-космическая техника и технология». Харьков «ХАИ». 2004 г. С. 32-36.