

УДК 621.039.533.6

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА В ДВИГАТЕЛЯХ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ДЛЯ АВТОНОМНЫХ ГИБРИДНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Шустров Ф. А.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)» (Университет машиностроения), (107023, г. Москва, ул. Большая Семеновская, д.38), e-mail: shustrov@yandex.ru.

В статье проведен анализ особенностей использования водородного топлива в двигателях внутреннего сгорания для автономных гибридных энергетических систем, рассмотрены различные методы питания двигателей внутреннего сгорания водородом. Помимо этого рассмотрены варианты автономного питания ДВС водородом, в том числе с применением конверсии углеводородных топлив с утилизацией энергии отработавших газов. Дано обоснование выбора исходного сырья для получения водородсодержащего газа и способа конверсии. Рассмотрены основные направления исследований катализаторов сухой конверсии метанола в синтез-газ, отражены их преимущества и недостатки. На основании анализа особенностей использования водородного топлива в двигателях внутреннего сгорания для автономных гибридных энергетических систем сделан вывод о целесообразности использования автономного питания двигателя внутреннего сгорания водородом, получаемым в процессе сухой термокаталитической конверсии метанола в присутствии металлической платины, стабилизированной на оксиде алюминия, нанесенном на высокопористый проницаемый ячеистый пенометалл.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, водородное топливо, автономная гибридная энергетическая система, термокаталитическая конверсия метанола.

FEATURES OF USE OF HYDROGEN FUEL IN INTERNAL COMBUSTION ENGINES FOR THE AUTONOMOUS HYBRID POWER SYSTEMS

Shustrov F. A.

Moscow State University of Mechanical Engineering (UMech), (107023, Moscow, Bolshaya Semenovskaya str., 38), e-mail: shustrov@yandex.ru.

This paper analyzes features of use of hydrogen fuel in internal combustion engines for the autonomous hybrid power systems, discussed various methods of supply hydrogen internal combustion engines. Besides embodiments discussed autonomous supply hydrogen engine, including using the conversion of hydrocarbon fuels with the exhaust gas energy recovery. Provide justification for the choice of feedstock to produce hydrogen gas and the conversion process. The main research areas of catalysts in the dry reforming of methanol synthesis gas, reflected their advantages and disadvantages. On the basis of analyzing the use of hydrogen fuel in internal combustion engines for autonomous hybrid power systems concluded that the feasibility of using autonomous power an internal combustion engine with hydrogen produced during the conversion of methanol in the presence of platinum metal stabilized on alumina deposited on a highly porous permeable cellular metallic foam.

Key words: internal combustion engine, hydrogen fuel, autonomous hybrid power system, conversion of methanol.

Изменение климата является одной из наиболее значительных угроз общественному здоровью и глобальной окружающей среде. Оно вызвано избытком в атмосфере парниковых газов. Парниковые газы имеют как естественное, так и антропогенное происхождение. Автономные энергетические системы, особенно применяемые на транспорте, выбрасывают более трети всех антропогенных парниковых газов, причем из четырех парниковых газов (CO₂, CH₄, N₂O и галогенированные углеводороды) критичным является CO₂, на долю которого приходится почти 90 % выбросов всех парниковых газов [3]. Эти выбросы связаны со сгоранием топлива и пропорциональны его расходу.

Решение этих проблем требует реализации радикально новых технологических подходов. Одним из таких подходов, направленных на резкое сокращение потребления ископаемых нефтяных топлив и уменьшение вредных выбросов, является гибридизация автономной энергетической системы с применением технологий водородной энергетики и использованием в качестве топлива водорода (чистого H_2 или в виде синтез-газа (H_2+CO)).

Использование в ДВС водородного топлива вместо традиционных нефтяных топлив позволяет дополнительно улучшить топливную экономичность и экологические показатели автономной энергетической системы. Физические и химические свойства водорода значительно отличаются от свойств нефтяных топлив и являются ключом к экологически чистому и эффективному сгоранию. Благодаря тому, что водородное топливо не содержит углерод, продукты его сгорания в воздухе теоретически не могут содержать CO_2 , CO , CH и ДЧ. На практике при работе ДВС на водороде эти компоненты присутствуют в очень небольшом количестве в отработавших газах (ОГ) из-за сгорания в двигателе моторного масла. Кроме того, при работе на очень бедных смесях в отработавших газах может присутствовать в небольшом количестве перекись водорода, а на богатых смесях за катализатором – аммиак.

Основными токсичными компонентами, образующимися при сгорании водорода в двигателе, являются оксиды азота. В ДВС с искровым зажиганием при сгорании водорода на полной нагрузке максимальные выбросы NO_x почти в два раза выше, чем при сгорании нефтяных топлив из-за повышенной температуры горения водорода. Однако на частичных нагрузках выбросы NO_x с ОГ можно поддерживать на низком уровне, работая на очень бедных смесях. По данным [7] на двигателе гибридного автомобиля, работающем на бедной гомогенной смеси водорода и воздуха ($\alpha \geq 2,5$), удалось обеспечить выполнение экологических норм EZEV (на порядок более жестких, чем нормы ULEV (США) и Евро-4) по выбросам NO_x без каталитической обработки ОГ.

Также возможна частичная замена нефтяного топлива, используемого для питания двигателя внутреннего сгорания, водородом, либо водородсодержащим газом, что позволяет значительно улучшить его экономические и экологические показатели [6].

Использование водорода в качестве топлива для автономных энергосистем выводит на первый план проблему их энерговооруженности. Современные системы хранения водорода неприемлемы для использования на транспортных средствах из-за малой емкости, технической сложности и небезопасности при аварийных ситуациях.

Питание как транспортных, так и стационарных установок на основе ДВС водородом может быть реализовано централизованным, либо автономным способом. Централизованный способ предусматривает наличие емкости для хранения водорода, что значительно снижает

энерговооруженность установки, а также наличие развитой инфраструктуры для их заправки. При использовании автономного способа питания водород производится непосредственно на борту автотранспортного средства, либо в непосредственной близости от стационарной энергоустановки.

Одним из вариантов автономного получения водорода для питания силовой установки является конверсия жидкого топлива, при которой происходит его газификация и изменение химического состава. Процесс конверсии нефтяного топлива отличается гетерогенностью и многостадийностью химических превращений углеводородов. Применение в качестве исходного сырья для получения водорода легких углеводородов, имеющих относительно простую химическую структуру, предпочтительно, вследствие упрощения процесса конверсии и исключения побочных химических реакций.

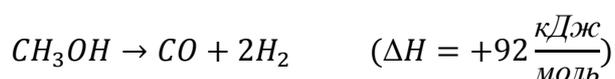
Конверсия углеводородного топлива с получением водородсодержащего газа характеризуется отрицательным энергетическим балансом, что обусловлено преобладанием эндотермических реакций. Это позволяет дополнительно увеличить эффективный КПД двигателя внутреннего сгорания за счет утилизации тепловой энергии, отводимой с отработавшими газами, которая в двигателях с искровым зажиганием составляет 30...35 % от теплоты, полученной в результате сгорания топлива [1].

При использовании для конверсии энергии, отводимой от двигателя внутреннего сгорания отработавшими газами, необходимо учитывать температуру диссоциации исходного топлива. Очевидно, что для топлив, температура диссоциации которых (с учетом использования соответствующего катализатора) выше средней температуры отработавших газов, данный метод нецелесообразен, так как требует подвода дополнительной энергии. К числу химических соединений с температурой диссоциации ниже средней температуры отработавших газов относятся простейшие эфиры (диметиловый, диэтиловый), низшие одноатомные спирты (метиловый, этиловый) и другие [5].

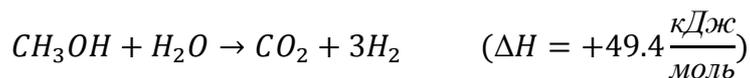
Одним из перспективных источников водорода для автономного питания силовых установок является метиловый спирт (метанол). Основными преимуществами метанола являются: мягкие условия конверсии, отсутствие необходимости предварительной конверсии, возможность получения из возобновляемых ресурсов.

Получение водородсодержащего газа из метанола возможно несколькими различными способами:

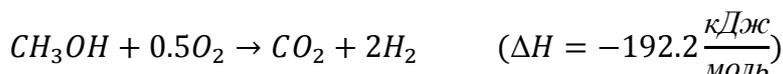
1. Сухая конверсия



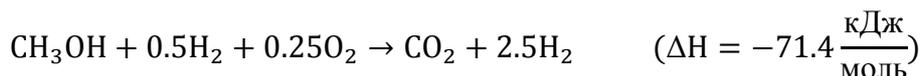
2. Паровая конверсия



3. Метод частичного окисления



4. Окислительная паровая конверсия



Из вышеперечисленных способов получения синтез-газа из метанола, методы частичного окисления и окислительной паровой конверсии невозможно использовать для утилизации тепловой энергии отработавших газов, так как они сопровождаются выделением теплоты.

Сухая конверсия метанола по сравнению с паровой конверсией обладает более высоким эндотермическим эффектом, не требует поддержания заранее заданного соотношения воды и метанола в исходном продукте, исключает возможность протекания побочных химических процессов.

Условия протекания реакции сухой конверсии метанола, ее селективность и производительность напрямую зависят от правильного выбора катализатора, причем для эффективной работы реактора в составе силовой установки на основе двигателя внутреннего сгорания к катализатору предъявляются следующие требования:

- 1) низкие рабочие температуры (не более 350 °С);
- 2) высокая термостойкость для исключения разрушения каталитического слоя при перегреве реактора (до 700 °С);
- 3) высокая степень конверсии на заданных расходах;
- 4) высокая селективность в заданном диапазоне температур;
- 5) механическая прочность;
- б) большая удельная поверхность.

Современные исследования катализаторов конверсии метанола ведутся в четырех основных направлениях: оксидные системы на основе меди, никельсодержащие системы, благородные металлы и интерметаллические соединения.

Оксидные системы на основе меди обладают высокой эффективностью при сравнительно низких температурах, имеют низкую себестоимость, но теряют

каталитическую активность при контакте с кислородом, что обуславливает необходимость его регулярной регенерации.

Каталитические системы на основе никеля также имеют высокую активность при низких температурах, но при повышении температуры возрастает процент содержания метана в продуктах реакции, что негативно влияет на стабильность состава продуктов конверсии метанола.

Катализаторы с применением благородных металлов обладают наибольшей активностью, однако для их оптимальной работы необходимы более высокие температуры, что достижимо при использовании теплоты отработавших газов двигателя внутреннего сгорания.

В последние годы ведутся активные разработки катализаторов на основе интерметаллических соединений, которые обладают высокой механической прочностью и не теряют каталитической активности при контакте с кислородом, однако еще не нашли широкого применения в практике.

Катализатор, особенно при его высокой удельной стоимости, не используется в чистом виде, в таких случаях применяются разнообразные подложки. В качестве подложки может использоваться инертный, либо малоактивный материал как естественного, так и искусственного происхождения. Наибольшее распространение в гетерогенном катализе получили такие подложки, как алюмосиликаты, оксиды алюминия, магния, циркония и другие.

Для увеличения эффективной удельной поверхности и механической прочности, подложку с нанесенным на нее катализатором зачастую располагают на носителе, в качестве которого могут выступать свернутая в спираль металлическая лента, блоки с сотовой структурой, пеноматериалы с открытой пористостью и другие.

Высокопористые проницаемые ячеистые металлы и сплавы благодаря своей структуре обеспечивают интенсивный массо- и теплообмен по всему объему катализатора, его равномерную газодинамическую и тепловую нагрузку за счет малого гидравлического сопротивления и турбулизации потока газа [2]. Это позволяет на порядок снизить содержание каталитически активного вещества по сравнению с аналогичными каталитическими блоками на основе сотовой керамики [4].

На основании анализа особенностей использования водородного топлива в двигателях внутреннего сгорания для автономных гибридных энергетических систем можно сделать вывод о целесообразности использования автономного питания двигателя внутреннего сгорания водородом, получаемым в процессе сухой термокаталитической конверсии метанола в присутствии металлической платины, стабилизированной на оксиде алюминия,

нанесенном на высокопористый проницаемый ячеистый пенометалл. Реактор конверсии метанола может быть интегрирован в систему выпуска отработавших газов питаемого ДВС, что позволит повысить его эффективный КПД.

Исследование особенностей использования водородного топлива в двигателях внутреннего сгорания для автономных гибридных энергетических систем проводится в рамках работы по разработке научно-технических решений по экологически чистым технологиям аккумулирования энергии в автономных энергетических системах с применением водородного двигателя внутреннего сгорания в качестве первичного источника энергии при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках государственного контракта № 14.516.11.0055 от «21» июня 2013 г.

Список литературы

1. Двигатели внутреннего сгорания. В 4 т. Под ред. А. С. Орлина, М. Г. Круглова. – М.: Машиностроение, 1980 – 1985.
2. Лебедев В. П. Минимизация воздействия на окружающую среду выбросов от технологического оборудования производства электронных компонентов: Автореф. дис... канд. техн. наук. – Пермь, 2009. – 8 с.
3. Машиностроение энциклопедия. В 40 т. / Под ред. К. С. Колесникова. – М.: Машиностроение, 2013. Т. IV–14: Н. А. Хрипач, Л. Ю. Лежнев, Л. В. Грехов, Н. А. Иващенко, В. А. Марков и др. Двигатели внутреннего сгорания. – С. 533.
4. Нейтрализаторы выхлопных газов автомобилей на основе высокопористых ячеистых материалов URL: <http://ekokataliz.ru/articles/exhaust.html> (дата обращения: 02.08.13).
5. Хрипач Н. А. Совершенствование экологических и топливоэкономических показателей работы двигателя с принудительным зажиганием применением предварительной термохимической конверсии метанола: дис... канд. техн. наук. – М., 2004. – С. 10.
6. Хрипач Н. А., Фомин В. М. Двигатель, работающий на смеси дизельного и водородного топлив. Тракторы и сельскохозяйственные машины/ – 2006. – № 5. – ISSN 0235-8573. – М.: Машиностроение. – С. 31–37.
7. P. V. Blarigan «Development of a Hydrogen Fueled Internal Combustion Engine Designed for Single Speed/power Operation», SAE Paper, № 961690, 1996.

Рецензенты:

Ерохов В. И., д.т.н., профессор, Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ), г.Москва.

Фомин В. М., д.т.н., профессор, Российский университет дружбы народов (РУДН), г.Москва.