

С. О. Пилипенко

Институт проблем
машиностроения
м. А. Н. Подгорного
НАН Украины,
г. Харьков, e-mail:
PilipenkoSergey7@gmail.com

Ключові слова: водень, світове енергоспоживання, альтернативні види палива, нормування викидів CO₂ автотранспортом, споживання викопного виду палива.

УДК. 662.769.2

ОБЗОР ЗАРУБЕЖНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ВОДОРОДА В КАЧЕСТВЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТОГО ТОПЛИВА В ДВИГАТЕЛЯХ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Проаналізовано динаміку розвитку світового енергетичного ринку з урахуванням зростання чисельності населення. Розглянуто проблему викидів CO₂ від згоряння вуглеводневих палив транспортними засобами. Висвітлено найбільш перспективні альтернативні види палива, що є похідними від інших ресурсів, відмінних від нафти. Проаналізовано відсоток потенційно застосовуваних альтернативних видів палива на автотранспорті. Шляхом дослідження цілого ряду факторів визначено, що водень – найбільш перспективне джерело енергії. Продемонстровано, що кінцева мета водневої технології передбачає витіснення викопних видів палива з автозаправного ринку, що є найкращим шляхом для забезпечення якнайшвидшого впровадження екологічно чистого енергоносія.

Введение

Более 99% топлива, используемого на транспорте, производится из нефти. Однако автомобили могут использовать и альтернативное топливо, вырабатываемое за счёт возобновляемых источников энергии, в первую очередь, из биомассы.

С возрастающей численностью населения возрастает и количество автомобилей. В 1985 году во всем мире насчитывалось 375 миллионов пассажирских автомобилей, а количество машин, используемых для перевозок, – 109 миллионов. В 2002 мировой пассажирский автопарк составлял уже 530 миллионов автомобилей. Лишь в 2005 году в мире было произведено 63 миллиона пассажирских автомобилей и легких грузовиков. В 2010 году количество автомобилей в мире превысило миллиард, и их количество неуклонно увеличивается, и с ростом численности населения (см. рис. 1) эта тенденция будет продолжаться [1].

Общее потребление энергии повысилось примерно на 36% за последние 15 лет [2]. Потребление энергии увеличится ещё больше в будущем, так как ожидается, что численность населения в мире вырастет на 2 миллиарда человек в течение ближайших 30 лет [1]. Тенденции развития энергетического рынка представлены на рис. 2. Увеличение спроса на энергию требует увеличения производства топлива. Следует обратить внимание на то, что около 60% нынешних запасов нефти в мире находится в регионах частых политических потрясений [2]. Это приводит к колебаниям цен на нефть и перебоям с её поставками.

Быстрое истощение запасов нефти и снижение качества воздуха заставляют задуматься о будущем.

Альтернативные виды топлива, такие, как биоводород, биодизель, биогаз, были опробованы во всем мире. Тем не менее, должны быть преодолены несколько препятствий до коммерциализации водорода в качестве моторного топлива двигателя внутреннего сгорания

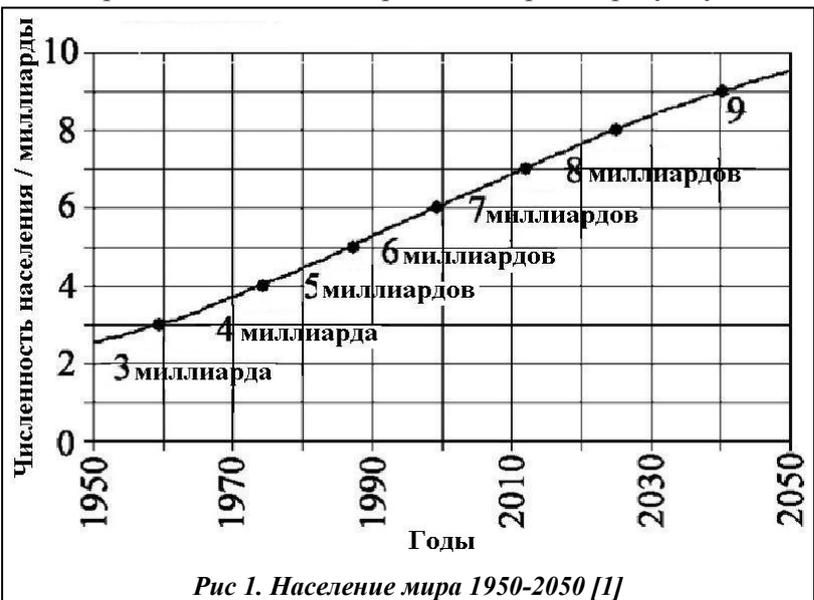
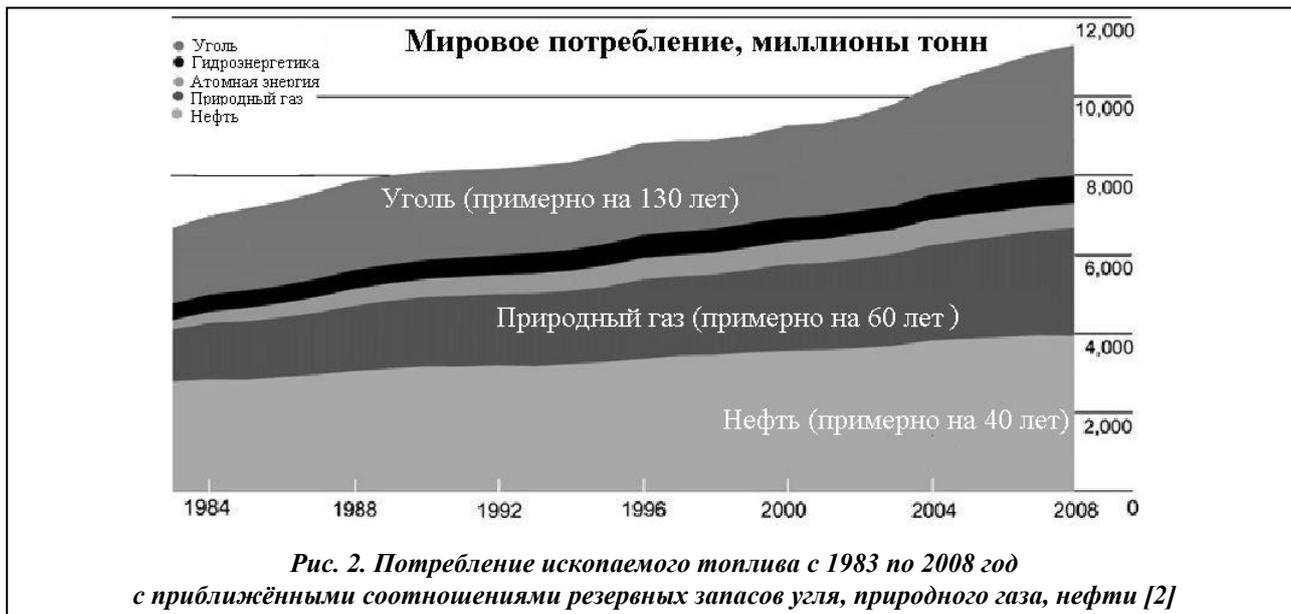


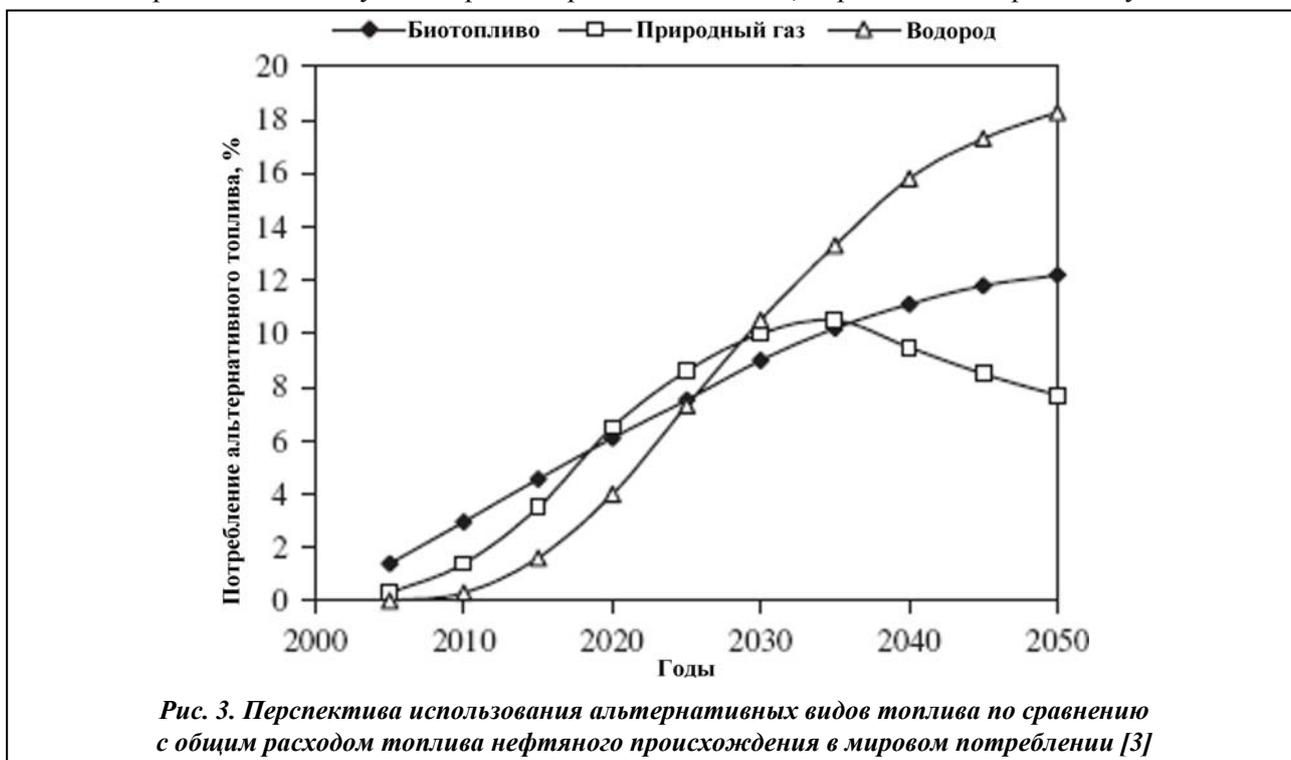
Рис 1. Население мира 1950-2050 [1]

© С. О. Пилипенко, 2014



(ДВС) для автомобильного транспорта. Смесь водорода и природного газа (СВПГ) можно рассматривать в качестве автомобильного топлива, не требуя каких-либо серьёзных модификаций в существующей конструкции ДВС.

Альтернативные топлива (от лат. alter — другой, один из двух) получают в основном из сырья не нефтяного происхождения, применяют для сокращения потребления нефти с использованием (после реконструкции) энергопотребляющих устройств, работающих на нефтяном топливе. Основные виды альтернативного топлива: сжиженные и компримированные горючие газы (ДСТУ 4047–2001); спирты, продукты их переработки и смеси с бензином (ДСТУ 4221–2003); топливные смеси (ДСТУ 4047–2001); искусственное жидкое топливо (ДСТУ 4058–2001); водород (ДСТУ 2655–94). Преимуществом этих видов топлива является то, что при их сгорании, по сравнению с бензином, образуется меньше загрязнителей воздуха. На рис. 3 приведены данные, отражающие перспективу использова-



ния альтернативных видов топлива по сравнению с общим расходом топлива нефтяного происхождения в мировом потреблении [3]

Таким образом, можно сделать вывод, что актуальность поиска альтернативных видов топлива стоит на сегодня особо остро [3].

Обзор тенденций нормирования выбросов CO₂ и расхода топлива для автотранспортных средств

В структуре выбросов CO₂ от транспорта основную роль играют выбросы от легковых автомобилей, грузовых и пассажирских автомобилей массой до 3,5 т (43,3%) и выбросы от грузового автотранспорта (22,2%) [4]. Заболеваемость городского населения бронхиальной астмой, хроническим бронхитом, болезнями сердца имеет устойчивую прямую связь с общим объёмом автомобильных выбросов. Международные исследования экономической оценки последствий загрязнения атмосферы показали, что наибольшая доля в возможном ущербе принадлежит экологической составляющей, связанной с влиянием выбросов автотранспорта в городской среде на здоровье людей. Эта компонента достигает 75–80% суммарного экологического ущерба от выбросов автотранспорта [5].

С целью снижения выбросов от автотранспорта в Европейском Союзе в апреле 2009 г. были приняты Правила № 443/2009, касающиеся ограничения выбросов CO₂ от новых легковых автомобилей категории М1. В соответствии с данными Правилами установлена цель: в целом по Европейскому Союзу достичь к 2012 г. средней величины выбросов CO₂ от новых легковых автомобилей на уровне 120 г/км, а после 2020 г. – 95 г/км [6].

Загрязнение воздуха в настоящее время является серьёзной глобальной проблемой. Это приводит к необходимости использования водорода в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания. Ресурсы водорода огромны, он считается одним из самых перспективных видов топлива для автомобильного транспорта. Необходимой инфраструктуры водорода и автозаправочных станций в настоящее время нет, поэтому широкое внедрение водородных транспортных средств не представляется возможным в ближайшем будущем. Одним из решений этой проблемы является сочетание водорода с метаном. Такие типы смесей могут извлекать выгоду из уникальных свойств сгорания водорода и в то же время сократить потребность в дефицитном газообразном углеводородном топливе. Объединение природного газа с водородом может быть потенциальной альтернативой обычным углеводородным топливам для применения в двигателях внутреннего сгорания [7].

Затраты на топлива для автотранспорта и их связь с эквивалентным выбросом CO₂ представлены на рис. 4 в нескольких видах топлива [8]. При сгорании водорода получаем меньше выбросов CO₂ в атмосферу, чем при применении сжиженного природного газа (СПГ), бензина или дизельного топлива. Из-за высокой цены на сырую нефть в некоторых случаях стоимость водорода ниже, чем у бен-

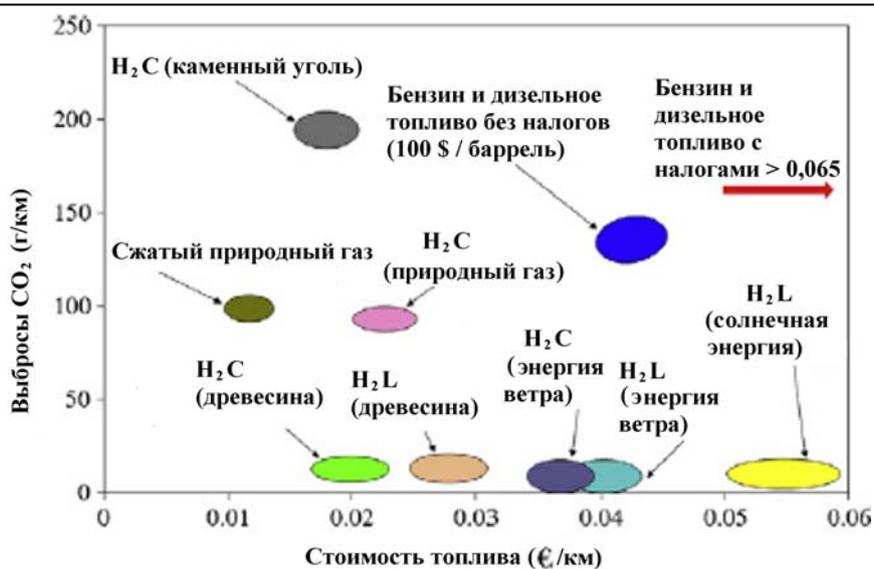


Рис. 4. Затраты на топлива для автотранспорта и их связь с эквивалентным выбросом CO₂ [8]

зина или дизельного топлива. Приведенные данные были подготовлены без учёта возможных последствий увеличения спроса или массового производства [8].

Водород – наиболее перспективное альтернативное топливо

Водород – один из наиболее перспективных источников энергии. Его запасы на нашей планете практически неисчерпаемы. В единице массы водорода содержится почти в 3 раза больше тепловой энергии, чем в бензине, но даже в жидком состоянии он занимает объём в 3,5 раза больший, чем эквивалентное по энергии количество бензина. Водород может применяться как топливо и на транспорте, и в промышленности, и в быту. Широкое его использование в качестве топлива будет способствовать сохранению чистоты окружающей среды. В процессе его сгорания образуются лишь пары дистиллированной воды и в незначительном количестве – оксид азота (NO_x). В то же время сжигание нефти, природного газа, угля сопровождается выбросами продуктов сгорания, опасными для здоровья человека, ухудшающими состояние почвы и поверхностных вод, разрушающими постройки, машины и оборудование.

Достижение поставленных целей по снижению выброса диоксида углерода требует совершенствования конструкции автомобиля с целью снижения расхода топлива, а также применения альтернативных топлив. На сегодняшний день является актуальным перевод двигателей внутреннего сгорания на водородное или бензино-водородное композиционное топливо. Водород чрезвычайно удобен для транспортировки. На большие расстояния его можно передавать по трубопроводам. Как и любое другое газообразное топливо, его можно накапливать и хранить длительное время как в обычных ёмкостях, так и в резервуарах природного происхождения, например в выработанных газовых месторождениях.

Аккумуляция водорода на автомобиле возможна в криогенных сосудах, в металлгидридах или баллонах высокого давления, в последнее время высказывается возможность использовать в качестве его аккумуляторов стеклянные микросферы [9], а также жидкие органические носители водорода [10]. Сложившаяся неопределённость в выборе способа аккумуляции водорода на автомобиле является следствием отсутствия единого подхода к оценке их эффективности. В отличие от жидких моторных топлив, для которых первичные энергетические затраты для их аккумуляции отсутствуют, водород может быть аккумулятирован либо в жидком виде, либо в связанном состоянии в виде металлгидридов, либо в газообразном состоянии при высоких давлениях, что вызывает дополнительные энергозатраты на переработку исходного газообразного водорода в состоянии, определяемом способом аккумуляции.

Криогенная система хранения водорода имеет ряд препятствий для массового применения на автотранспорте. Один литр жидкого водорода весит всего 0,07 кг, то есть его удельная плотность составляет 70,99 г/л при 20 К. Жидкий водород требует криогенной технологии хранения, такой, как специальные термически изолированные контейнеры, и особого обращения, что свойственно для всех криогенных материалов. Он близок в этом отношении к жидкому кислороду, но при работе с ним необходимо соблюдать меры пожарной безопасности. Даже в случае с контейнерами с тепловой изоляцией его тяжело содержать при той низкой температуре, которая требуется для его сохранения в жидком состоянии (обычно он испаряется со скоростью 1% в день).

Один из перспективных способов – хранение в металлгидридных композициях. Водород, оказывается, очень хорошо растворяется металлами, как вода впитывается губкой, причём он поглощается в огромных объёмах, значительно превосходящих объёмы «губки». Такие «напитанные» водородом металлы называются металлгидридами. При охлаждении они вбирают водород, при нагревании – активно его отдают [11]. Сторонники металлгидридного аккумуляирования считают, что определяющим являются минимальные первичные энергозатраты, простота конструкции аппаратуры и систем заправки, высокая пассивная безопасность, которые присущи металлгидридным системам. При этом допускаются уменьшение запаса хода автомобиля вследствие высокой удельной массы аккумулятора. Исследователи во всем мире уже давно рассматривают различные металлгидридные сплавы в качестве кандидатов для хранения водорода. Металлогидридные сплавы – это металлические сплавы, имеющие определенную структуру кристаллической решетки. Молекулы водорода из-за их небольших габаритов могут помещаться внутри кристаллической решетки сплава, занимая свободное пространство между атомами металла. Несмотря на все усилия, до последнего времени учё-

ным удавалось создавать лишь необычайно сложные металлгидридные сплавы, которые очень дороги в производстве и использование которых нецелесообразно с экономической точки зрения.

Для хранения газообразного водорода при давлениях до 100 МПа используют сварные сосуды с двух- и многослойными стенками. Внутренняя стенка такого сосуда выполнена из аустенитной нержавеющей стали или другого материала, совместимого с водородом в условиях высокого давления, внешние слои – из высокопрочных сталей. Применяются также бесшовные толстостенные сосуды из низкоуглеродистых сталей, рассчитанные на давления до 40–70 МПа [12]. Поскольку внутри баллона находится только сжатый газ, такая система хранения характеризуется объёмной плотностью водорода.

Использование водорода в качестве автомобильного топлива обещает значительное улучшение эффективности работы двигателей с искровым зажиганием. Водород характеризуется наличием самого высокого коэффициента использования энергии в массе всех химических видов топлива и с точки зрения массового расхода энергии превышает обычное бензиновое топливо примерно в три раза, а спирт в пять – шесть раз [13]. Таким образом, водородное топливо может увеличить эффективность двигателя и снизить удельный расход топлива.

Важным, как показали обширные исследования, проведенные в Институте проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, является также то, что массовые добавки водорода при сжигании обеднённых бензоводородовоздушных смесей существенным образом повышают полноту выгорания топлива, снижают уровни образования оксидов азота (NO_x), ингибируют процессы образования канцерогенных углеводородов и твёрдых частиц. В условиях городской эксплуатации легковых автомобилей при использовании обеднённых бензоводородовоздушных смесей в двигателях внутреннего сгорания (доля водорода составляет около 10% массы) обеспечивается: уменьшение расхода бензина до 40% (за счёт замещения бензина водородом и повышения эксплуатационной экономичности автомобилей), снижение выбросов с отработавшими газами: CO_2 — примерно на 40%, NO_x – в пять раз, а канцерогенных углеводородов – на порядок и более [14].

В топливных элементах (ТЭ) химическая энергия топлива и окислителя, непрерывно подводимых к электродам, превращается непосредственно в электрическую, в то время как в тепловых машинах процесс преобразования химической энергии протекает через несколько промежуточных стадий, в том числе через стадию образования теплоты. Выбор топлива и окислителя, подаваемых в ТЭ, определяется в первую очередь их электрохимической активностью — то есть скоростью реакций на электродах, стоимостью, возможностью легкого подвода реагента в топливных элементах и отвода продуктов реакции. В качестве топлива обычно используется водород, окислителем обычно является кислород воздуха [15].

Водородный топливный элемент генерирует электричество в процессе электрохимической реакции, в которой атомы поступающего под давлением водорода разлагаются на электроны и протоны. Электроны поступают во внешнюю цепь, создается электрический ток. Далее протоны проходят через мембрану, где с ними соединяется кислород и электроны. Единственным побочным продуктом такой реакции является водяной пар и тепло. Цена на водородные топливные элементы пока достаточно высока, однако надёжность и простота эксплуатации такого оборудования компенсируют этот недостаток.

Выводы

Результаты анализа позволяют сделать следующие выводы:

Конечная цель водородной технологии предусматривает вытеснение ископаемых видов топлива водородом и СПГ, что является наилучшим путём для обеспечения скорейшего внедрения водородного топлива в энергетическом секторе.

Основываясь на международных исследованиях экономической оценки последствий загрязнения атмосферы, определяем, что наибольшая доля в возможном ущербе принадлежит экологической составляющей, связанной с влиянием выбросов автотранспорта в городской среде на здоровье людей. Исследования альтернативных видов топлив позволяют сделать вывод, что сократить выбросы транспортными средствами можно при переходе на водородное топливо, при использовании которого в зависимости от типа энергоустройства выбросы загрязняющих веществ могут быть практически сведены к нулю. Следует также обратить особое внимание, как аргумент доказательства правиль-

но выбранного направления, что ресурсы водорода огромны, в единице веса водорода почти в три раза больше тепловой энергии, чем в бензине. Поэтому водород — один из самых перспективных видов топлива для автомобильного транспорта.

В сочетании с новыми передовыми технологиями водород в чистом виде и в смеси газов может обеспечить быстро растущую потребность в чистых и доступных энергетических ресурсах в мире.

Литература

1. *19502050 Population Division United States Census Bureau International Database. World population: 1950-2050.* <http://www.census.gov/ipc/www/idb/worldpopgraph.php>
2. *British Petroleum, BP statistical review of world energy, BP Annual Review.* – June 2009.
3. *Adeeb, Z. Glycerol delignification of poplar wood chips in aqueous medium / Z. Adeeb // Energy Educ Sci Techn.* – 2004. – Vol. 13. – P. 81–88.
4. *Fulton, L. Transport, Energy and CO₂ : Moving Toward Sustainability // 3rd INTERNATIONAL TAXI FORUM – 9 October, 2009.* – 25 p.
5. *McCubbin, D. R. The Health Costs of Motor-Vehicle-Related Air Pollution / D. R. McCubbin, M. A. Delucchi // J. Transport Economics and Policy.* – September 1999. – Vol. 33, part 3. – P. 253–286.
6. *Regulation (EC) №443/2009 of the European Parliament and of the Council setting emission performance standards for new passenger cars as part of the Community's integrated approach to reduce CO₂ emissions from light-duty vehicles.* – 23 April 2009. – 15 p.
7. *Hydrogen Enriched Compressed Natural Gas-A Futuristic Fuel for Internal Combustion Engines / K. Nanthagopal, R. Subbarao, T. Elango, P. Baskar, K. Annamalai // Thermal Sci.* – 2011. – Vol. 15, part 4. – P. 1145–1154.
8. *Navarro, E. CO₂ emissions from a spark ignition engine operating on natural gas-hydrogen blends (HCNG) / E. Navarro, T. J. Leo, R. Corral // Appl. Energy.* – 2013. – Vol. 101. – P. 112–120.
9. *Hinds, H. R. Hydrogen energy news and views / H. R. Hinds // Int. J. Hydrogen Energy.* – 1982. – № 7. – P. 205–209.
10. *Taube, M. / Liquid organic carrier of hydrogen as a fuel for automobiles / M. Taube, P. Taube // Proc. 3rd World Hydrogen Energy Conf. Tokyo, Japan.* – June 1980. – Vol. № 2. – P. 23–26.
11. *Чумаков, В. Разворот на водород / В. Чумаков // Вокруг света.* – 2006. – № 7 (2790). – С. 74–80.
12. *Болбас, Н. Водород на транспорте / Н. Болбас // Двигатель.* – 2005. – № 2. – С. 38.
13. *Тарасов, Б. П. Проблема хранения водорода и перспективы использования гидридов для аккумуляции водорода / Б. П. Тарасов, М. В. Лотоцкий, В. А. Яргысь // Рос. хим. журн.* – 2006. – Т. 50, № 6. – С. 34–49.
14. *Канило, П. М. / Перспективы становления водородной энергетики и транспорта / П. М. Канило, К. В. Костенко // Автомоб. трансп.* – 2008. – № 23. – С. 107–113.
15. *Коровин, Н. В. / Общая химия : Учеб. – М. : Высш. шк. 1998. – 559 с.*

Поступила в редакцию 12.02.15