

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УЩЕРБОВ ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ ВОДОРОДА КАК МОТОРНОГО ТОПЛИВА¹

В статье рассматриваются условия конкурентоспособности водорода по сравнению с традиционными углеводородными моторными топливами. Анализ экономической привлекательности различных альтернативных топлив проводится на основе специально разработанных моделей, позволяющих учитывать широкую вариацию технико-экономических параметров производства топлива, их распределения и использования. Основное внимание уделяется проблеме учета последствий от выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду, привлекающей интерес к использованию альтернативных, в частности водородных, технологий. Приводятся расчетные оценки полных стоимостных, энергетических и экологических затрат, соответствующих традиционным и водородным технологиям легкового автомобильного транспорта. Определены параметры водородных технологий, при которых они могут стать коммерчески привлекательными для пользователей.

Основными первичными энергоресурсами, обеспечивающими развитие современной цивилизации, являются ископаемые органические топлива: нефть, природный газ, уголь. Их сжигание сопровождается выбросами продуктов сгорания, опасными для здоровья человека, ухудшающими состояние почвы и поверхностных вод, разрушающими постройки, машины и оборудование и создающими угрозу изменения климата планеты. Особенно вредными являются выбросы от автотранспортных средств, которые, как правило, происходят в городских поселениях, где наблюдается наибольшая концентрация реципиентов (людей, зданий, сооружений), а источники выбросов расположены на небольшой высоте, что затрудняет рассеивание и многократно увеличивает концентрацию примесей в приземном слое атмосферы. Опасным для здоровья является большинство углеводородов бензинового ряда, поскольку они обладают наркотическим действием, вызывая нарушения центральной нервной системы. Выбросы твердых частиц образуют сажу – продукт частичного сгорания органического топлива. Оседая на кожных покровах, она может вызывать образование раковых опухолей. Канцерогенным эффектом обладают также многие полициклические ароматические соединения, наиболее опасным (при этом чрезвычайно стабильным) из которых является бензпирен.

Неполное сгорание углеводородов в двигателе приводит к образованию окиси углерода (CO). Следствием этого является кислородное голодание клеток и тканей, в том числе нервной системы. За счет горения топлива в воздухе, состоящем на 78% из азота (N₂), происходит образование окислов азота (NO_x). Попадая на слизистые оболочки, бронхи и ткани легких человека окислы азота наносят им значительные повреждения. Выхлопы автомобилей могут содержать также окислы серы (SO_x), которые имеют прямую корреляцию с ростом числа заболеваний дыхательных путей. Окислы серы катализируют процесс появления злокачественных новообразований, вызванных канцерогенами. Общий объем автомобильных выбросов имеет устойчивую прямую связь с заболеваемостью населения бронхиальной астмой, хроническим бронхитом, болезнями сердца.

От загрязнения страдают трава и деревья, растущие вдоль автомобильных дорог. Соединения азота и серы с кислородом (NO_x, SO_x) являются источниками кислотных дождей, которые приводят к деградации растительности и почвы. Окислы азота отрицательно действуют на листья, снижая интенсивность фотосинтеза, вызывая прекращение плодоношения и роста. Попадание окислов серы в клетки ведет к образованию соединений серы, токсичных для биохимических и физиологических процессов.

¹ Статья подготовлена при поддержке Российского гуманитарного научного фонда (проект № 08-02-00431а).

Выпадение осадков, содержащих оксиды азота и оксиды серы, приводит к разрушению цементных построек, мраморных скульптур и других памятников архитектуры, наносит смертельный вред животному миру водоемов. К этим локальным загрязнителям следует добавить выбросы углекислого газа, имеющие глобальный характер и ведущие к опасным изменениям климата. Поэтому многие страны принимают законодательные акты, ограничивающие выбросы загрязняющих веществ в окружающую среду.

Сегодня учет экологических факторов становится важным элементом обоснования инновационных направлений в различных отраслях экономики. В этой связи в 90-х годах прошлого века за рубежом (США и Западная Европа) были развернуты работы по оценке социальных последствий использования различных видов топлива [1, 2]. В результате этих работ оценены размеры экологических ущербов для населения, сельского и лесного хозяйства, городской среды и других объектов, подверженных воздействию загрязнителей, образующихся в процессе работы энергетических установок. В настоящее время выводы этих исследований становятся рекомендациями для обоснования стратегий долгосрочного развития территорий и бизнеса. Оценка внешних эффектов в дополнение к прямым затратам позволяет по-иному подойти к обоснованию выбора новых технологий, повышает качество рекомендаций по определению приоритетных направлений научных исследований и проектно-конструкторских разработок. В России эти работы пока находятся на начальной стадии.

Особенно сложно проблема охраны окружающей среды решается в условиях массовой эксплуатации мобильных транспортных установок. По данным Министерства природных ресурсов РФ, выбросы автотранспортных средств возросли с 2000 по 2005 г. на 14,2% и составили в 2005 г. 15,4 тыс. т, или 43% суммарных выбросов в атмосферу всеми российскими потребителями топлива [3]. Около 75% выбросов приходится на окись углерода (CO), по 11-12% на летучие органические соединения (VOC) и окислы азота (NO_x). Выбросы углекислого газа достигли более 120 млн. т. (2005 г.), что дает около 30% суммарных выбросов в целом по России. Согласно прогнозам, в России в ближайшие годы ожидается ежегодный рост парка легковых автомобилей не менее чем на 5% [4], что будет соответствовать примерно 32-35 млн. ед. к 2010 г. Такой рост числа автомобилей, в случае сохранения существующей структуры парка, приведет к увеличению выбросов автотранспортом к 2010 г. примерно на 25%.

Виды альтернативных моторных топлив. Радикальный путь сокращения выбросов транспортными средствами состоит в переходе на водород, электроэнергию, биотопливо, т.е. на альтернативные энергоносители, при использовании которых выбросы загрязняющих веществ частично или полностью отсутствуют. Наряду с явными преимуществами эти альтернативы имеют свои ограничения и недостатки: использование биодизеля, этанола, метанола и других топлив, сырье для которых имеет растительное происхождение, оказывает влияние на рост стоимости сельскохозяйственной продукции и лишь отчасти снижает выбросы в окружающую среду. Кроме того, метанол является опасным токсичным веществом, а этанол в российских условиях исключается по социальным причинам; электрические аккумуляторы требуют частой и длительной зарядки, они характеризуются наличием значительных косвенных выбросов в окружающую среду, так как производство электроэнергии на тепловых электростанциях в течение длительного времени будет основано на сжигании различных углеродосодержащих топлив.

Высокая стоимость, низкая мощность солнечных фотоэлектрических преобразователей делает базирующийся на них транспорт неконкурентоспособным. Поэтому среди имеющихся альтернатив наибольший интерес представляет водород. Однако и этот путь не всегда приводит к сокращению общего загрязнения окружающей среды. Так, если использование альтернативных энергоносителей непо-

средственно на транспортном средстве и дает заметное сокращение выбросов, то производство этих видов энергии может сопровождаться значительным выходом загрязнителей. Эта особенность должна обязательно учитываться при выборе приоритетных направлений инновационной деятельности в автомобильном транспорте.

Ниже основное внимание уделено водороду как альтернативному энергоносителю в сравнении с традиционными автомобильными топливами, используемыми в двигателях внутреннего сгорания (бензин, дизельное и газообразное топливо).

Бензиновый двигатель по величине КПД имеет относительно низкую эффективность, так как способен преобразовывать в полезную работу всего лишь около 20-30% энергии топлива. Стандартный дизельный двигатель имеет несколько более высокий КПД (до 30-40%), а дизели с турбонаддувом и промежуточным охлаждением даже до 50%. В выхлопных газах дизельного двигателя меньше окиси углерода (CO), чем у бензинового двигателя. Важным преимуществом дизельного топлива является большая безопасность, так как оно хуже испаряется, что снижает вероятность возгорания дизельных двигателей по сравнению с бензиновыми. Явными недостатками дизелей являются использование стартера большей мощности, возможное осаждение парафинов в системах топливоподдачи при низких температурах, сложность и относительная дороговизна ремонта топливной аппаратуры. Дизельные моторы крайне чувствительны к загрязнению топлива механическими частицами и водой.

Основное преимущество двигателей, работающих на газообразном топливе, состоит в его более низкой стоимости по сравнению с жидкими топливами. Срок службы газовых двигателей больше, поскольку в топливе отсутствуют тяжелые углеводороды, продукты которых в процессе эксплуатации образуют нагар на стенках камер сгорания. Использование газа приносит ощутимые выгоды по сравнению с бензином: уменьшаются зазоры в механических соединениях, увеличивается в 1,5-2 раза срок службы моторного смазочного масла, снижается уровень шума работы двигателя как минимум в 2 раза, в 1,5 раза увеличивается межремонтный период работы двигателя, а срок службы свечей зажигания – на 40% [5]. Происходит снижение выбросов окислов углерода, азота и летучих органических соединений. К недостаткам можно отнести необходимость изготовления ряда деталей двигателя из специальных сталей в связи с более высокой температурой в камерах сгорания и снижение мощности двигателя на 10-15%. Помимо этого природный газ более взрывоопасен, обладает свойством высокой летучести, и его утечки многократно усиливают парниковый эффект.

Основная проблема использования традиционных моторных топлив заключается в том, что сырьем для их производства служит сырая нефть. Между тем ситуация на рынке нефти постоянно ухудшается. Это связано с быстрым истощением дешевых запасов нефти и неизбежным ростом ее цены. К этому следует добавить, что природные запасы нефти размещены неравномерно, что создает большую напряженность на рынках нефти и является сильным стимулом к ее значительному удорожанию. В этой связи в развитых странах мира, лишенных по большей части собственных запасов нефти, предпринимаются усилия к поиску эффективной замены традиционных моторных топлив другими более доступными энергоносителями².

Целесообразность выбора водорода в качестве моторного топлива на автотранспорте прежде всего связана с освоением топливных элементов (ТЭ) как источника электроэнергии для электромотора, с помощью которого происходит перемещение автомобиля.

² Известен достаточно широкий круг альтернатив, теоретически способных заменить традиционные моторные топлива из сырой нефти. К их числу можно отнести: водород, получение моторных топлив из природного газа, угля, биомассы, электроэнергию и др. Однако все эти альтернативы пока уступают по экономическим показателям углеводородным топливам из сырой нефти. Поэтому стоит неоплощенная задача: определить наиболее перспективные направления, которые смогли бы успешно конкурировать с традиционными моторными топливами через одно-два десятилетия, когда мир неизбежно столкнется с проблемой истощения запасов дешевой нефти и многократным ростом цены моторных топлив.

Существует несколько типов топливных элементов, различаемых в зависимости от внутреннего устройства и состава электролита. Из них самыми известными сегодня являются: твердооксидный ТЭ (SOFC – Solid Oxide Fuel Cell); ТЭ с протонообменной мембраной (PEM – Proton Exchange Membrane); фосфорно-кислый ТЭ (PAFC – Phosphorus Acid Fuel Cell) и щелочной ТЭ (AFC – Alkaline Fuel Cell). Большинство указанных типов ТЭ (кроме PEM) имеют высокую рабочую температуру (до 1000°C), что затрудняет их использование в двигателе автомобиля. Требование обеспечения в автомобиле низких рабочих температур (до 100°C) делает наиболее перспективными именно ТЭ типа PEM. Их выходные мощности находятся в диапазоне от 1 Вт до 250 кВт, что определяет широкий круг возможных потребителей.

Автомобили на базе водорода имеют более высокую эффективность: КПД топливного элемента достигает 60% и более. Водородный автомобиль является высокоэкологичным, так как выбросами от ТЭ являются пары воды, а от самого автомобиля – только мелкие частицы при изнашивании тормозных колодок и шин. Однако сегодня основными препятствиями для массового производства таких автомобилей остаются их высокая стоимость и отсутствие необходимой инфраструктуры (доставки, хранения водорода и заправки автомобилей). Совершенствование самого ТЭ и элементов инфраструктуры являются решающими факторами для коммерциализации водорода как моторного топлива на автотранспорте.

Доля водорода по весу в недрах Земли составляет 1%, а по числу атомов 17% [6]. Хотя водород как вещество в чистом виде практически не встречается, он входит в состав многочисленных химических соединений. Поэтому получение водорода в чистом виде требует значительных затрат энергии. Это делает его достаточно дорогим энергоносителем. Стоимостной фактор является одним из основных, определяющих спрос на водород как энергоноситель в промышленных масштабах.

Стоимость энергоресурсов, используемых для производства водорода. Существует широкий ряд технологий, позволяющих получать водород. В их основе лежат процессы выделения водорода из природных органических топлив на базе физико-химических превращений или разложения молекул воды под воздействием электрического тока или высокотемпературного нагрева³. Поэтому стоимость исходных компонентов реакций получения водорода имеет первостепенное значение.

В качестве базовых исходных параметров для оценки стоимости водорода приняты значения прогнозных равновесных цен на основные природные энергоресурсы в период 2020-2030 гг., когда можно реально предполагать появление конкурентоспособных водородных технологий на внутреннем рынке России. Эти ценовые параметры были получены при разработке перспективного топливно-энергетического баланса страны на период до 2030 г. [7]. Для водородных технологий в рассматриваемой перспективе наибольший интерес будут представлять цены следующих природных энергоносителей (в ценах 2005 г.):

сырая нефть, долл./т (долл./барр.)	– 730-1465 (100-200)*
природный газ, долл./тыс. куб. м	– 360-775**
уголь, долл./т н.э.	– 70-95
электроэнергия от энергосистемы, долл./МВт·ч	– 10-15

* В середине 2008 г. цена сырой нефти на спотовом рынке достигла 120-140 долл./барр. Поэтому вполне вероятно, что к 2020 г. цена сырой нефти на мировом рынке будет превышать принятые значения.

** Net-back price для России при принятых значениях цен сырой нефти и отношении цены нефти к цене газа равном 1:0,7 (по тепловому эквиваленту) с учетом затрат на транспорт газа за пределами страны в размере около 60-70 долл./1000 куб. м.

Существуют и другие технологии получения водорода, например, путем биохимических реакций; пиролизом углеводородов, угля, древесины и отходов; взаимодействием воды с металлами; биофотоллизом воды. Однако все они еще далеки от промышленного освоения.

При принятых допущениях о цене сырой нефти цены традиционных моторных топлив (без налогов)⁴ будут составлять: бензин – 1-1,5 долл./л, дизельное топливо – 0,9-1,3 долл./л, природный газ – 0,4-0,8 долл./л (использованы ценовые коэффициенты нефти и нефтепродуктов на современных спот-рынках Западной Европы [8]). Можно ожидать, что верхний уровень ценовых показателей через 10-15 лет будет соответствовать ситуации в российском ТЭК.

Для исследования условий эффективного применения водорода был разработан комплекс моделей, описывающих различные способы производства водорода и его использования на автотранспорте. В моделях рассматриваются основные элементы водородного цикла: производство водорода, хранение, доставка, заправка и конечное использование в легковом автотранспорте. Для каждого из элементов рассчитывается прирост стоимости 1 кг водорода по всей технологической цепи от добычи сырья для получения водорода до его использования в ТЭ, установленных на автомобиле. Отдельно оценены выбросы в окружающую среду по трем стадиям: добыча и производство энергоресурсов как сырья для производства водорода, собственно получение водорода и его доставка до заправочной станции, использование водорода непосредственно в автомобиле. Дополнительно учтены также выбросы, возникающие при производстве конструкционных материалов для изготовления автомобиля. В итоге были получены оценки полной стоимости пробега автомобиля и сопутствующих этой технологии загрязнений окружающей среды.

Блок *производства водорода* позволяет рассчитать стоимость получения 1 кг водорода при централизованном и децентрализованном его производстве. В модели рассматриваются два состояния водорода: в сжиженном (при -253°C) и газообразном виде под давлением (до 800 атм.). В этом блоке рассчитывается структура и технико-экономические показатели четырех основных технологий производства водорода централизованным способом: паровая конверсия метана (ПКМ); газификация угля; электролиз воды (при работе на электроэнергии от энергосистемы, от ветровой электростанции (ВЭС), электростанции на солнечных элементах (СЭС); термохимическое разложение воды с использованием теплоты от высокотемпературного газоохлаждаемого ядерного реактора (ВТГР). Расчеты выполнены для масштабов централизованного производства водорода в размере около 100 т в сутки и около 500 кг в децентрализованных системах. Подробное описание данного блока модели дано в работе [9].

В расчетах были использованы следующие стоимостные параметры основных элементов производственных схем (в ценах начала 2000-х годов):

электролизер	– 740 долл./кВт (при децентрализованном производстве – 2000 долл./кВт)
установка для реформинга метана	– 25 долл./кг H_2 (при децентрализованном производстве – 125 долл./кг H_2)
водородный компрессор	– 1000 долл./кВт
установка по сжижению H_2	– 1100 долл./кг H_2 /сут.
хранение водорода в сжатом виде	– 85 долл./кг H_2 (при децентрализованном производстве – 850 долл./кг H_2), хранение жидкого водорода – 20 долл./кг H_2

Для безуглеродных способов получения водорода были приняты следующие удельные капиталовложения:

ВТГР [10], долл./кВт (по тепловой мощности)	– 450-550
ВЭС [11], долл./кВт (по электрической мощности)	– 1000-1500
СЭС [12], долл./кВт (по электрической мощности)	– 2000-3000

Во всех вариантах учтены также дополнительные затраты для перехода к **полным** инвестициям (в процентах от суммарной стоимости основного оборудования):

обеспечение энергией, водой и т.п.	– 20
проектирование, наладка оборудования и т.п.	– 15 (при децентрализованном производстве – 10)
непредвиденные расходы	– 10
оборотные средства, стоимость земли и др.	– 7 (при децентрализованном производстве – 9)

⁴ Как известно, практически во всем мире цены моторных топлив несут также социальную нагрузку в виде налоговых платежей, которые в некоторых странах достигают 50% и более. Это означает, что с учетом указанного фактора конкурентоспособность водорода может значительно повыситься по сравнению с полученными ниже выводами.

Срок службы объектов принят равным 20 годам. Прочие переменные затраты, кроме топлива и энергии, составляют 1% в год от полных капиталовложений; постоянные эксплуатационные издержки – 5% в год. Рентабельность инвестиций принята на уровне 12% в год. В табл. 1 приведены ожидаемые значения стоимости 1 кг водорода, получаемого в условиях централизованного и децентрализованного способов производства.

Таблица 1

Прогнозные оценки стоимости газообразного и сжиженного водорода при различных способах его производства в период 2020-2030 гг., долл./кг

Показатель	Газообразный водород	Сжиженный водород
Централизованное производство		
ПКМ	2,2-4,3	4,3-6,8
Газификация угля	2,1-2,4	4,3-5,2
ВТГР	3,1-3,6	5,5-6,5
Электролиз:		
от энергосистемы	6,6-9,1	8,6-11,6
ВЭС	9,8-13,8	12,3-17,0
СЭС	17,8-25,8	21,8-31,3
Децентрализованное производство		
ПКМ	5,2-7,6	-
Электролиз от энергосистемы	12,9-15,6	-

Примечание: Меньшие значения соответствуют приведенным выше нижним уровням цен на энергоресурсы, используемым для производства водорода, а большие – высоким уровням цен энергоресурсов.

Блок хранения водорода. В качестве технологий хранения рассмотрены емкости под давлением (800 атм.) для газообразного водорода и криогенные танки для хранения сжиженного водорода (-253°С). При построении схем технологических процессов и в расчетах основных экономических показателей хранения водорода были использованы данные, приведенные в работах [13, 14]. В расчетах приняты следующие удельные капиталовложения в элементы технологий хранения водорода:

компрессор – 1000 долл./кВт
установка сжижения водорода – 44,1 тыс. долл./кг H₂/ч)
резервуары для сжатого водорода – 20 тыс. долл./куб. м H₂ (для сжиженного водорода – 31,2 тыс. долл./куб. м H₂)

Срок службы оборудования: компрессоры – 6 лет, резервуары – 22 года. При этих условиях хранение водорода в размере суточной производительности 100 т будет стоить около 0,42 долл./кг для газообразного водорода и 2,34 долл./кг для жидкого водорода.

Блок доставки водорода. Для транспорта сжатого водорода используются грузовые автомобили с емкостями высокого давления или трубопровод, для сжиженного водорода – грузовой автомобиль с криогенным танком. Средний объем перевозки водорода одним грузовым автомобилем составляет около 1400 кг для газообразного водорода под давлением и примерно 1600 кг для жидкого водорода.

Удельные капиталовложения в элементы технологий транспорта водорода приняты по работам [13, 14]:

грузовик-тягач – 90 тыс. долл.
прицеп-платформа для перевозки емкостей – 60 тыс. долл.
емкости для перевозки сжатого водорода – 100 тыс. долл. (для сжиженного водорода – 350 тыс. долл.)
компрессор – 1000 долл./кВт
трубопровод – 2 млн. долл./км

Срок службы элементов технологий транспорта водорода: грузовики – 6 лет, цистерны – 4 года, компрессоры – 6 лет, трубопроводы – 22 года. Стоимость доставки водорода на расстояние 50 км будет составлять: для газообразного водорода –

0,13 долл./кг при автомобильных перевозках и 0,61 долл./кг при транспорте по трубопроводу, а для жидкого водорода – 0,16 долл./кг.

Блок заправки автомобиля используется для оценки затрат на заправку автомобилей на жидком и на газообразном водороде под давлением. В результате моделирования определяется та часть стоимости водорода, которая приходится на заправочную станцию. При этом капитальные затраты на одну раздаточную колонку с одним краном для сжатого водорода приняты в размере 70 тыс. долл. (для сжиженного водорода – 130 тыс. долл.) [15]. Срок службы раздаточной колонки составляет для сжатого водорода 10 лет (для сжиженного – 8 лет). При этих данных стоимость водорода у потребителя возрастает на 0,21 долл./кг для сжатого водорода и на 0,11 долл./кг для жидкого.

Таким образом, инфраструктурные затраты в сумме увеличивают стоимость водорода в баке автомобиля на 0,8-1,3 долл./кг для газообразного водорода и примерно на 2,6 долл./кг для сжиженного по сравнению с затратами его получения на заводе при централизованном производстве или при децентрализованном производстве водорода непосредственно на АЗС.

В *блоке конечного использования* выполняется окончательный расчет стоимости 100 км пробега автомобиля. Здесь рассматриваются пять типов легковых транспортных средств: два класса водородных автомобилей с ТЭ на сжатом и сжиженном водороде и три типа автомобилей с двигателем внутреннего сгорания на бензиновом, дизельном и газообразном топливе. Расходы топлива в автомобиле составляют: водород – 1 кг/100 км [16], бензин – 6,5 л/100 км, дизельное топливо – 5,5 л/100 км, газообразное топливо – 10 л/100 км. Срок службы автомобиля принят равным 10 годам при пробеге 20 тыс. км ежегодно (доля пробега, приходящаяся на городской цикл составляет 65%).

Количественные оценки полного потребления энергии и сопутствующих им выбросов загрязняющих веществ при использовании различных технологий автомобильного транспорта определены на основе модели GREET [17], которая позволяет оценить выбросы не только от использования топлива непосредственно в двигателе автомобиля, но и по всему топливному циклу от добычи сырья (топлива) до бака автомобиля, а также по циклу, связанному с производством транспортных средств. Это дает возможность оценить полную нагрузку отдельных технологий на окружающую среду и подойти к расчету социальной стоимости сравниваемых технологий. В настоящей работе параметры модели GREET были настроены на ожидаемые показатели топливно-энергетического баланса России в 2020-2030 гг. в соответствии с результатами, полученными в работе [7], что повышает достоверность выводов относительно конкурентоспособности различных вариантов. В табл. 2 приведены основные топливные характеристики сравниваемых автомобилей и расчетные выбросы в атмосферу.

Приведенные данные показывают, что автомобиль на водороде является практически идеально чистой технологией, так как имеет почти нулевые выбросы, если рассматривать только стадию использования. Однако при этом не учитываются значительные затраты энергии и соответствующие выбросы в окружающую среду на стадиях добычи сырья для получения водорода или генерирования электроэнергии. К этому целесообразно добавить затраты на стадии производства традиционного и водородного автомобилей, так как состав используемых материалов заметно различается. В этой связи для корректного сопоставления технологий следует анализировать полные затраты энергии и выбросы.

В табл. 3 приведены результаты расчета полных затрат энергоресурсов, возникающих при использовании традиционных моторных топлив и водорода, получаемого на базе различных технологий при централизованном и децентрализованном способах производства, а также сопутствующих им полных выбросов основных загрязнителей атмосферного воздуха.

Таблица 2

Характеристика сравнимых типов автомобилей*

Показатель	Автомобиль с ДВС, л/100 км			Автомобиль на ТЭ (водородный), кг H ₂ /100 км	
	бензин	дизельное топливо	природный газ	Сжатый водо- род	Сжиженный водород
Расход топлива на 100 км	8,0	5,0	10,0	1,0	1,0
в том числе в городском цикле, %	125	125	125	125%	125%
Пробег за год, км	20000	20000	20000	20000	20000
в том числе городской цикл, %	65	65	65	65	65
Выбросы в атмосферу при эксплуатации автомобиля, г/100 км					
CO ₂	15 677	13 841	12 935	0	0
VOC	11,185	5,468	8,625	0	0
CO	101,284	50,952	101,284	0	0
NO _x	6,089	8,078	6,089	0	0
PM _{2,5-10} **	1,777	1,833	1,777	1,274	1,274
PM _{менее 2,5} ***	0,920	0,976	0,920	0,454	0,454
SO _x	0,256	0,093	0,058	0	0

* Рассчитано по модели GREET.
** PM_{2,5-10} – твердые частицы размером от 2,5 до 10 мкм.
*** PM_{менее 2,5} – твердые частицы размером менее 2,5 мкм.

При этом в соответствии с моделями GREET были выделены три стадии формирования затрат: топливный цикл – получение моторного топлива и его доставка до АЗС («от скважины до АЗС» – Well-to-Pump); эксплуатация автомобиля – использование топлива непосредственно в автомобиле (вместе с Well-to-Pump дает Well-to-Wheel); производство автомобиля – затраты энергоресурсов и сопутствующие выбросы в процессе изготовления автомобиля.

Такой комплексный подход позволяет обоснованно подойти к экономической оценке ущербов в результате использования различных технологий автотранспорта.

Как следует из табл. 3, традиционные технологии требуют от 275 до 350 МДж/100 км. При этом непосредственно в автомобиле расходуется около 2/3 таких энергозатрат, остальные распределены примерно поровну между расходами на получение моторных топлив и изготовление автомобиля, включая материалы. При этом суммарные выбросы CO₂ достигают 20-25 кг/100 км, а остальных загрязнителей от 160 г (суммарно по весу без учета токсичности выбросов) для дизельного топлива до 225-230 г для бензина и природного газа.

Водородные технологии (кроме электролиза) при централизованном производстве энергоносителя имеют суммарные энергозатраты на 20-40% ниже, чем при использовании традиционных моторных топлив. Выбросы CO₂ зависят от способа производства водорода: при использовании тепла от ВТГР они составляют примерно треть эмиссии бензинового двигателя; в случае газификации угля оказываются практически равнозначными с традиционными двигателями, а при электролизе на базе электроэнергии, получаемой от энергосистемы, на 55-60% больше. Выбросы остальных загрязнителей для водородных технологий находятся в пределах 50-60% выбросов при использовании традиционных моторных топлив.

В случае использования электролиза для получения водорода показатели сильно зависят от источника электроснабжения: при снабжении от энергосистемы энергозатраты оказываются в 1,4-1,5 раза выше⁵, чем для бензинового топлива, но при использовании возобновляемых источников энергии (СЭС или ВЭС) они не превышают 70%.

⁵ При ожидаемой структуре генерирования электроэнергии в России в период после 2020 г.

Таблица 3

Оценка полных расходов энергии и выбросов в атмосферу для различных технологий автомобильного транспорта

Тип производства	Централизованное производство					Децентрализованное производство		Традиционные автомобили		
	ПКМ	Газификация угля	ВТИР	Электролиз (от энергосистемы)	Электролиз (ВЭС, СЭС)	ПКМ	Электролиз (от энергосистемы)	Бензин	Дизельное топливо	Природный газ
<i>Газообразный водород</i>										
Всего энергия, МДж/100 км	251,6	256,8	193,7	480,8	225,8	233,8	455,4	326,9	273,6	348,0
Топливный цикл, %	35	36	16	66	28	30	64	17	14	19
Эксплуатация автомобиля, %	37	36	48	19	41	40	21	66	66	65
Производство автомобиля, %	28	27	36	14	31	30	15	17	20	16
Выбросы, г/100 км:										
CO ₂ *	17,3	25,0	8,0	39,1	7,6	16,2	37,1	23,9	21,5	23,3
VOC	17,6	17,8	16,6	19,2	16,6	17,4	19,0	33,2	23,3	26,9
CO	30,1	28,2	27,4	35,8	27,2	29,2	35,1	135,3	84,0	135,7
NO _x	21,3	12,7	11,8	45,2	11,0	14,4	42,0	22,8	22,2	28,0
PM _{2,5-10}	13,9	37,8	13,0	52,5	12,5	13,5	50,0	12,2	11,7	12,5
PM _{менее 2,5}	5,9	10,9	4,7	15,2	4,6	5,7	14,6	5,1	4,9	5,0
SO _x	30,4	29,9	28,5	99,1	27,6	28,6	94,5	16,2	15,1	19,6
<i>Жидкий водород</i>										
Всего энергия, МДж/100 км	323,8	342,3	279,3	673,7	311,5	-	-	326,9	273,6	348,0
Топливный цикл, %	50	52	42	76	48	-	-	17	14	19
Эксплуатация автомобиля, %	29	27	33	14	30	-	-	66	66	65
Производство автомобиля, %	22	20	25	10	22	-	-	17	20	16
Суммарные выбросы по всем циклам, г/100 км:										
CO ₂ *	23,2	32,0	14,9	54,9	14,5	-	-	23,9	21,5	23,3
VOC	18,1	18,4	17,2	20,5	17,1	-	-	33,2	23,3	26,9
CO	31,4	30,1	29,3	40,0	29,0	-	-	135,3	84,0	135,7
NO _x	27,9	19,6	18,7	61,7	18,0	-	-	22,8	22,2	28,0
PM _{2,5-10}	22,7	46,6	21,7	72,4	21,2	-	-	12,2	11,7	12,5
PM _{менее 2,5}	8,2	13,3	7,1	20,5	6,9	-	-	5,1	4,9	5,0
SO _x	45,9	45,5	44,1	134,7	43,2	-	-	16,2	15,1	19,6

* В кг CO₂/100 км.

Что касается вредных выбросов, то они имеют ту же тенденцию. Выбросы CO₂ при электроснабжении от энергосистемы возрастают на 60% по сравнению с бензиновым двигателем, но при производстве электроэнергии на возобновляемых источниках они снижаются до одной трети. Примерно такие же соотношения имеют место по другим загрязнителям.

Важным аспектом сравнения технологий автотранспорта является стоимостная оценка затрат. Анализ зарубежных исследований показывает, что возможное удорожание водородного автомобиля при выходе на коммерческое использование оценивается в размере около 20-25% относительно бензинового [18] при стоимости последнего для автомобиля среднего класса около 20-23 тыс. долл. (2008 г.). При расчетах годовых затрат на эксплуатацию автомобиля учтены также сопутствующие дополнительные издержки (в процентах от стоимости автомобиля): страховая премия – 5; обслуживание – 1,5 (дизельный) и 1,0 (остальные автомобили); непредвиденные расходы (ремонты, шиномонтаж и пр.) – 1,0.

Наиболее сложной и проблематичной является экономическая оценка ущерба от загрязнения окружающей среды. Такая оценка зависит от большого числа факторов и имеет широкий диапазон значений, приводимых в зарубежных источниках. Поэтому в данной статье этот показатель носит скорее иллюстративный характер, чтобы обозначить значимость фактора экологических ущербов при выборе водородных технологий.

Зарубежные исследования по вопросам экономической оценки последствий загрязнения атмосферы показали, что наибольшая доля в возможном ущербе принадлежит составляющей, связанной с влиянием загрязнения на здоровье людей. Эта компонента достигает 75-80% суммарного экологического ущерба от выбросов автотранспорта [19]. В приводимых ниже расчетах значения ущерба для здоровья людей приняты по данным, содержащим наиболее подробные оценки для условий США начала 90-х годов прошлого века. Для приведения оценок ущербов к ценам 2005 г. был произведен пересчет показателей ущербов путем использования соответствующего дефлятора потребительских цен для США. Учитывая, что экономические параметры здравоохранения в США и России существенно различны, в расчетах были использованы только минимальные оценки ожидаемого ущерба в среднем по стране с последующим условным масштабированием оценок по множителю 10 (для средних городских поселений) и множителю 100 (для крупных городов-мегаполисов). Такой подход, хотя и имеет большую степень условности, однако в первом приближении достаточно хорошо отражает зависимость ущерба от характера территории, где происходят выбросы загрязняющих веществ. В табл. 4 приведены оценки ущербов для здоровья людей, использованные для расчета стоимостной компоненты влияния выбросов автотранспорта на стоимость пробега.

Таблица 4

Экономическая оценка ущербов для здоровья людей в результате воздействия основных загрязнителей автотранспорта, долл./кг выбросов*

Показатель	Варианты ущербов по зонам		
	I	II	III
CO ₂ **	0,05	0,05	0,05
VOC	0,14	1,42	14,17
CO	0,01	0,14	1,42
NO _x	1,56	15,59	155,86
PM _{2,5-10}	0,38	3,83	38,26
PM _{менее 2,5}	4,56	45,62	456,24
SO _x	3,97	39,67	396,73

* По данным [19], пересчитанным к условиям 2005 г.
** Рассчитано по данным [2].

Условно принято, что вариант I соответствует эксплуатации автомобиля в загородном цикле и в малых населенных пунктах, II в средних населенных пунктах и III в крупных городах.

В итоге на основе моделей производства водорода и его использования в транспорте и моделей оценки выбросов в окружающую среду (подробное описание разработанных моделей дано в [20]) были получены значения ожидаемой стоимости 100 км пробега автомобиля по трем основным ее составляющим: топливный цикл (производство топлива, его доставка, хранение и заправка на АЗС), затраты на автомобиль (стоимость автомобиля, страхование, обслуживание, амортизация, ремонт и пр.), экологический ущерб (оценка в денежном выражении негативного эффекта эмиссии загрязняющих веществ при использовании автомобиля на здоровье людей) (табл. 5). Данные табл. 5 соответствуют верхнему диапазону приведенных выше цен на энергоносители. Как следует из данных табл. 5, оценка полной стоимости 100 км пробега делает водородный автомобиль на газообразном водороде вполне конкурентоспособным по сравнению с автомобилем с бензиновым двигателем, если водород получают при централизованном производстве по технологиям ПКМ, газификации угля, термохимического разложения воды с использованием ВТГР. Экономия затрат для этих технологий составляет от 10 до 20% по сравнению с бензином. При децентрализованном производстве водорода путем паровой конверсии метана стоимость пробега оказывается практически сопоставимой с традиционным топливом. Остальные способы производства водорода имеют более высокие стоимостные показатели, чем для бензинового двигателя. Тем не менее серьезный интерес представляют электролиз на электроэнергии от энергосистемы и с использованием энергии ВЭС, исследуемый параметр для них всего на 5-10% выше, чем для бензинового автомобиля.

При использовании водорода, произведенного централизованно на СЭС, 100 км пробега обойдется примерно на 20-40% дороже. Эта технология требует дальнейшего существенного усовершенствования для снижения стоимости СЭС (ниже 2000 долл./кВт, принятых в расчетах для СЭС). При принятых значениях жидкий водород полностью выпадает из поля конкурентоспособных технологий.

Включение экологических ущербов в оценки затрат не меняет радикально ситуацию в пользу водородных технологий. Доля экологического ущерба возрастает по мере увеличения использования автомобиля в городском цикле. Для традиционных топлив эта составляющая затрат достигает от 8-10% (2,8-2,9 долл./100 км) при 25-процентной доле пробега в условиях крупного города, до 13-15% (4,4-4,6 долл./100 км), если автомобиль используется только в городских условиях. В случае использования водорода минимальный ущерб следует ожидать для безуглеродных технологий получения водорода – на базе ВТГР или возобновляемых источников энергии. В этих случаях стоимость ущербов составляет 1,8-2 долл./100 км, т.е. значительно ниже, чем для традиционных моторных топлив. Использование водорода, получаемого на базе ПКМ и газификации угля, несколько превышает ущербы при безуглеродных технологиях, но они существенно ниже, чем для бензина и дизельного топлива. Технология получения водорода на базе электролиза от энергосистемы характеризуется наибольшими выбросами в окружающую среду, что приводит к большим экологическим ущербам, достигающим 10-11% полных затрат на пробег автотранспорта.

В условиях неопределенности экономических оценок целесообразно определить ожидаемые риски, которые могут возникать при коммерциализации водородных технологий. В работе рассмотрено влияние двух категорий рисков: одна, связанная со стоимостью энергоносителей для производства водорода и традиционных моторных топлив, ожидаемой в перспективе, и вторая, отражающая влияние оценок экологического ущерба.

Таблица 5

Сравнение затрат по традиционным и водородным технологиям автотранспорта на 100 км пробега
(для верхнего диапазона оценок стоимости энергоносителей, см. табл. 1), долл./100 км

Технологии	Стоимость топлива	Стоимость автомобиля	Итого без ущерба	Экологический ущерб при доле пробега в городском цикле, долл./100 км*, %				Итого полные затраты при доле пробега в городском цикле, долл./100 км, %			
				25	50	75	100	25	50	75	100
Традиционные автомобили											
Бензин	12,8	18,5	31,3	2,9	3,5	4,1	4,6	34,1	34,7	35,3	35,9
Дизельное топливо	6,8	20,7	27,5	2,8	3,4	4,0	4,5	30,2	30,8	31,4	32,0
Природный газ	6,4	19,3	25,7	2,8	3,3	3,9	4,4	28,5	29,1	29,6	30,1
Сжатый водород											
Централизованное производство водорода											
ПКМ (природный газ)	5,3	23,1	28,5	2,4	2,4	2,5	2,5	30,8	30,9	30,9	31,0
Газификация угля	3,4	23,1	26,5	2,8	2,8	2,9	3,0	29,3	29,4	29,4	29,5
Термохимическое разложение на базе ВТГР	4,2	23,1	27,4	1,8	1,9	1,9	2,0	29,2	29,2	29,3	29,3
Электролиз от энергосистемы	10,5	23,1	33,6	3,9	4,0	4,0	4,1	37,5	37,6	37,7	37,7
Электролиз от ВЭС	11,2	23,1	34,3	1,8	1,8	1,9	2,0	36,1	36,2	36,2	36,3
Электролиз от СЭС	19,7	23,1	42,9	1,8	1,8	1,9	2,0	44,6	44,7	44,8	44,8
Децентрализованное производство водорода											
ПКМ (природный газ)	8,7	23,1	31,8	2,3	2,3	2,4	2,4	34,1	34,2	34,2	34,3
Электролиз от энергосистемы	17,3	23,1	40,4	3,8	3,8	3,9	4,0	44,2	44,2	44,3	44,3
Электролиз от СЭС	34,2	23,1	57,3	1,6	1,7	1,8	1,8	58,9	59,0	59,1	59,1
Сжиженный водород											
Централизованное производство водорода											
ПКМ (природный газ)	10,0	26,6	36,6	2,8	2,8	2,9	2,9	39,4	39,4	39,5	39,5
Газификация угля	8,3	26,6	34,9	3,3	3,3	3,4	3,4	38,1	38,2	38,2	38,3
Термохимическое разложение на базе ВТГР	9,2	26,6	35,8	2,3	2,3	2,4	2,5	38,0	38,1	38,1	38,2
Электролиз от энергосистемы	15,0	26,6	41,6	5,0	5,0	5,1	5,2	46,6	46,7	46,7	46,8
Электролиз от ВЭС	15,8	26,6	42,4	2,2	2,3	2,4	2,4	44,7	44,7	44,8	44,8
Электролиз от СЭС	25,9	26,6	52,5	2,2	2,3	2,4	2,4	54,7	54,8	54,9	54,9

* В расчетах принято, что выбросы топливного цикла происходят в зоне ущерба I (низкая плотность населения), производство автомобиля – в зоне II (средняя плотность населения), эксплуатация автомобиля осуществляется в зонах III (городской цикл) и I (загородный цикл).

На рис. 1 показаны значения стоимости 100 км пробега рассматриваемых технологий автотранспорта при двух крайних значениях цен энергоносителей, принятых в расчетах, с учетом стоимости экологического ущерба для крупных городов и мегаполисов (категория III, см. табл. 4). При «низких» ценах на традиционное моторное топливо водородные технологии оказываются экономически малопривлекательными. Однако при «высоких» ценах картина существенно меняется: водород при централизованном производстве на базе природного газа, угля и ядерной энергии требует более низких затрат по сравнению с традиционными технологиями транспорта на базе двигателя внутреннего сгорания.

Стоимость 100 км пробега, долл.

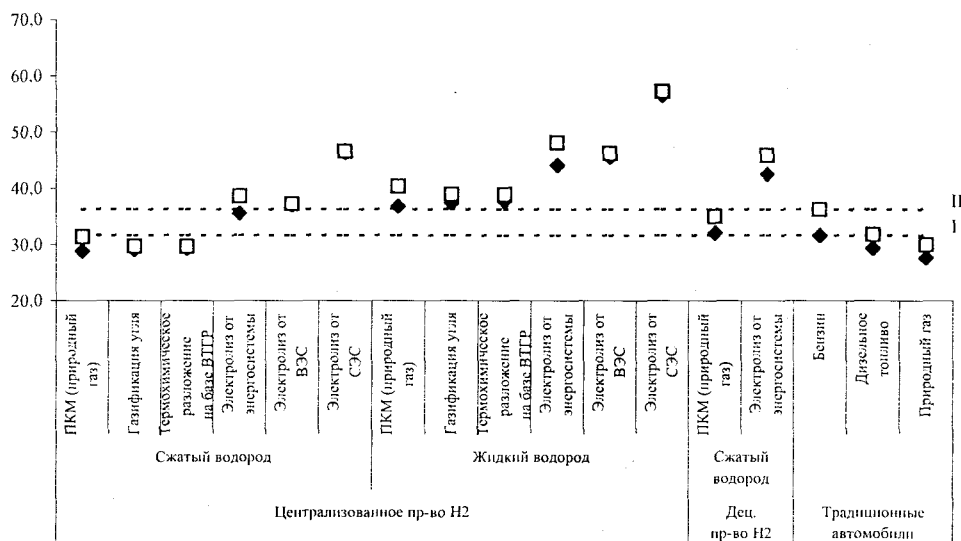


Рис. 1. Сравнение ожидаемых значений полной стоимости 100 км пробега для автомобилей на традиционных и водородных топливах:

I – нижний диапазон цен бензина (♦), 1 долл./л; II – верхний диапазон цен (□), 1,5 долл./л (пунктирные линии показывают диапазон полной стоимости 100 км пробега для традиционных автомобилей на бензине)

На рис. 2 показана зависимость стоимости 100 км пробега для водородных и традиционных технологий автотранспорта от характера территории, где это происходит: местности с низкой плотностью населения (I – загородный цикл), городские поселения (II) и крупные города и мегаполисы (III). Расчеты выполнены при сравнении технологий для верхнего диапазона прогнозных цен энергоносителей. Учет экологической составляющей практически не меняет общих выводов относительно предпочтительности технологий. Независимо от категории местности автомобили на водороде, получаемом централизованным путем на базе природного газа (ПКМ), угля (газификация) или путем термохимического разложения воды с использованием тепла ВТГР, остаются более экономически эффективными, чем традиционные автомобили на бензине и практически равноэкономичными с автомобилями на дизельном топливе или природном газе.

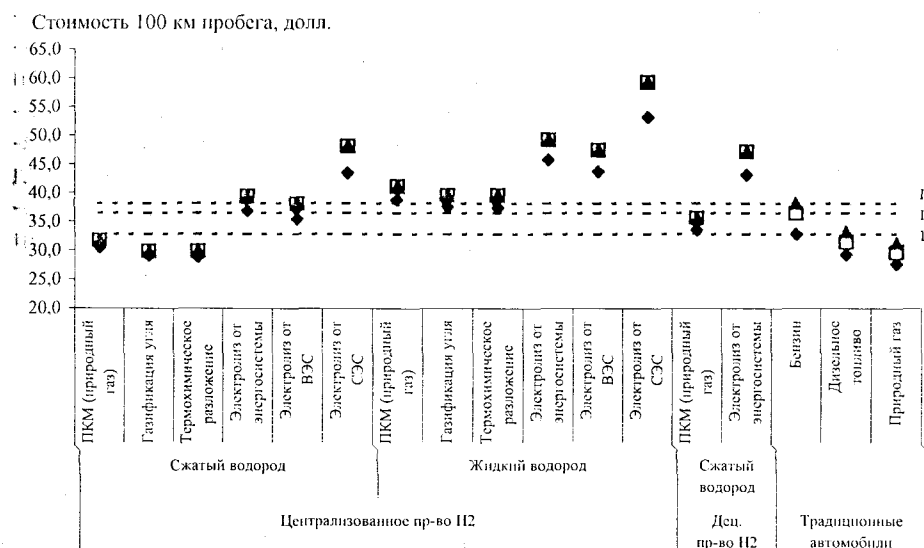


Рис. 2. Влияние стоимости ущерба на стоимость 100 км пробега для верхнего диапазона цен традиционного моторного топлива (1,5 долл./л): I – загородный цикл (♦); II – городские поселения (□); III – крупные города и мегаполисы (▲), см. табл. 4 (пунктирные линии показывают полные затраты на 100 км пробега (включая ущербы) для традиционных автомобилей на бензине в условиях трех типов поселений)

Таким образом, водород как энергоноситель в автотранспорте даже при относительно осторожных оценках динамики роста цен на сырую нефть и экологического ущерба может стать вполне конкурентоспособным по сравнению с традиционными моторными топливами. Более интенсивный рост цен сырой нефти приведет только к увеличению конкурентоспособности водородного транспорта, особенно при производстве водорода на базе угля, ядерной энергии или возобновляемых источников. Одновременно по мере освоения будет происходить удешевление водородных технологий. Более точный учет экологического фактора также будет способствовать усилению привлекательности водорода.

Основным сдерживающим фактором на пути использования водорода в автотранспорте является высокая стоимость ТЭ. До недавнего времени цены РЕМ ТЭ оставались чрезвычайно высокими (не менее 2000–4000 долл./кВт), прежде всего в связи с большим расходом платины для производства электродов (около 20 г/кВт). В начале текущего столетия производственные затраты на изготовление ТЭ сократились примерно до 225 долл./кВт [21]. Этого удалось достичь за счет снижения менее чем за десять лет расхода платины до 0,8 г/кВт и других усовершенствований в устройстве ТЭ. Однако чтобы водородный автомобиль стал конкурентоспособным с традиционными автомобилями, стоимость ТЭ должна снизиться до 35–50 долл./кВт, т.е. в 5–6 раз. Вместе с тем сегодня началась жесткая конкуренция между двумя новыми технологиями автомобильного транспорта: ТЭ на водороде и электроавтомобиль на базе электроаккумулятора. Обе они имеют в основе электродвигатель, который питается в одном случае электроэнергией, вырабатываемой на борту автомобиля, а в другом – электроэнергией поступающей от энергосистемы и накапливаемой в аккумуляторах. Однако будущее электроавтомобиля зависит также от существенного технологического прорыва, направленного на создание эффективных и дешевых накопителей электроэнергии. Чтобы успешно конкурировать с традиционным автомобилем и с ав-

томобилем на ТЭ, стоимость накопителей электроэнергии и их вес должны снизиться, по крайней мере, в 15-20 раз при условии практически ежедневной разрядки и зарядки аккумулятора, обеспечивающей пробег около 100 км/сут. Какая из этих технологий раньше достигнет полной конкурентоспособности по сравнению с двигателями на углеводородных топливах, покажут ближайшие годы. Совершенно очевидно, что та из них, которая первой станет коммерчески эффективной, будет основой развития автомобильного транспорта в XXI в.

Литература

1. ExternE Externalities of Energy Methodology 2005 Update, Edited by Peter Bickel and Rainer Friedrich. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung — IER, Universität Stuttgart, Germany.
2. Litman T.A. Transportation Cost and Benefit Analysis. Techniques, Estimates and Implications, Victoria Transport Policy Institute, 17 May 2007.
3. Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, <http://www.mnr.gov.ru>.
4. Галичанин Е. Почему двигатель «чихает», Мировая Энергетика, № 10 (46), октябрь 2007г.
5. Муджир Е. Газ — на полную!, Известия в Украине, 21.01.08, <http://www.izvestia.com.ua/?articles/2008/01/21/190432-9>
6. Кузнецов В.И. Водород: легкие изотопы // Химия и Жизнь. 1981. №1.
7. Некрасов А.С., Сияк Ю.В. Перспективы развития топливно-энергетического комплекса России на период до 2030 года // Проблемы прогнозирования. 2007. № 4.
8. OPEC Bulletin. 2008. № 6.
9. Сияк Ю.В. Петров В.Ю. Прогнозные оценки стоимости водорода в условиях его централизованного производства // Проблемы прогнозирования. 2008. № 3.
10. Schultz K.R. Use of the Modular Helium Reactor for Hydrogen Production, World Nuclear Association Annual Symposium, 3-5 September 2003, London.
11. Texas RPS: Range of Discussion Renewable Energy Sub-Committee. TERC Renewable Energy Presentation, 24 September 2004.
12. Fawcett A., Solar Energy in SGM Renewable Energy Modeling Series, December 6, 2004, U.S. Environmental Protection Agency.
13. Amos W. Costs of Storing and Transporting Hydrogen, National Renewable Energy Laboratory, November 1998, <http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/25106.pdf>.
14. Padró C.E.G. and Putsche V. Survey of the Economics of Hydrogen Technologies, NREL, September 1999.
15. Jonathan X. Weinert, Liu Shaofun, Joan M. Ogden, Ma Jianxin. Hydrogen Refueling Station Costs in Shanghai. Tongji University and University of California Davis. February, 2007. <http://repositories.cdlib.org/itsdavis/ISD-ITS-RR-06-04/>
16. <http://www.hydrogencarsnow.com>.
17. The Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation (GREET) Model, Transportation Technology R&D Center, <http://www.transportation.anl.gov/software/GREET/>
18. Thomas C. E. (Sandy), James B.D., Lomax F.D., Jr. and Kuhn I. F., Integrated Analysis of Hydrogen Passenger Vehicle Transportation Pathways, Proceedings of the 1998 U.S. DOE Hydrogen Program Review.
19. McCubbin D.R., Delucchi M.A. The Health Costs of Motor-Vehicle-Related Air Pollution // Journal of Transport Economics and Policy. September 1999. Volume 33, Part 3.
20. Петров В. Ю. Конкурентоспособность водорода как моторного топлива на автомобильном транспорте // Труды ИИП РАН. 2008.
21. <http://www.fuelcells.org/info/library/QuestionsandAnswers062404.pdf>.