



ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТРАНСПОРТ

Транспортные средства на водородном топливе

HYDROGEN ENERGY AND TRANSPORT

Hydrogen fuel vehicles

УДК 621.43

ПРИМЕНЕНИЕ ВОДОРОДА В КАЧЕСТВЕ МОТОРНОГО ТОПЛИВА ДЛЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ. ИСТОРИЯ, НАСТОЯЩЕЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

*А. Ю. Раменский ☼, П. Б. Шелищ ☼, С. И. Нефедкин**



Member of International Editorial Board

Национальная ассоциация водородной энергетики (НАВЭ), Россия

* Московский энергетический институт (технический университет), Россия

В работе рассматриваются вопросы, связанные с использованием водорода в качестве моторного топлива для автомобильных двигателей внутреннего сгорания. Рассмотрены исторические, экономические и технические аспекты этой важной научно-технической, инновационной и экономической проблемы.

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ВОДОРОДНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

В России практическое применение водорода в качестве моторного топлива началось в 1941 г. В Великую Отечественную войну в блокадном Ленинграде техник-лейтенант Шелищ Б. И. (рис. 1) предложил использовать водород, «отработавший» в аэростатах, как моторное топливо.

Были переоборудованы для работы на водороде несколько сотен ГАЗ-АА [1] (рис. 2).



Рис. 1. Портрет Б. И. Шелища работы Резаева А. А. (2005 г.)

Позже в семидесятые годы в нескольких научно-исследовательских организациях СССР интенсивно проводились работы по использованию водорода в качестве добавки к бензину. Наиболее известны такие центры как НАМИ, ИПМАШ АН УССР, СМНС АН СССР.

В частности, в НАМИ под руководством Шатрова Е. В. были проведены научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию бензоводородного микроавтобуса РАФ 22034. Была разработана бензоводородная система питания двигателя. Она прошла полный комплекс стендовых и лабораторно-дорожных испытаний [2–4].

На рис. 3 фотографии Шатрова Е. В. — научного руководителя проекта и Кузнецова В. М. —



Рис. 2. ГАЗ-АА на водороде

руководителя группы водородных двигателей, внесших существенный вклад в организацию НИОКР по созданию бензоводородного автомобиля в НАМИ.



Рис. 3. Шатров Е. В. (слева) и Кузнецов В. М. (справа)

Как головной институт Министерства автомобильной промышленности СССР, НАМИ тесно сотрудничал с ведущими научно-исследовательскими организациями страны — ИПМАШ АН УССР, Сектором механики неоднородных



Рис. 4. Микроавтобус РАФ 22031, работающий на бензоводородных топливных композициях

сред АН СССР, Законом ВТУЗом при ЗИЛе, ИМаш АН СССР и др.

Примером такого сотрудничества были совместные исследования с ИПМаш АН УССР, директором которого в те времена был Подгорный А. Н., внесший большой вклад в развитие водородной энергетики в целом. В области применения водорода на автомобиле следует обратить внимание на работы руководителей ведущих подразделений института: Варшавского И. Л., Мищенко А. И., Соловья В. В. и многих других [5]. На фотографии (рис. 5), запечатлена встреча сотрудников ИПМаш АН УССР Подгорного А. Н., Соловья В. В. и др. с президентами АН СССР Александровым А. П. и АН УССР Патонем Б. Е.



Рис. 5. Встреча руководителей АН СССР и АН УССР с сотрудниками ИПМаш АН УССР

Широко известны разработки этого института по созданию автомобилей и автопогрузчиков, работающих на бензоводородных топливных композициях с металлогидридными системами хранения водорода на борту. Некоторые образцы таких разработок показаны на рис. 6 и рис. 7.

Другим примером сотрудничества НАМИ с ведущими НИИ страны была работа по созданию металлогидридных систем хранения водорода на автомобиле.

В рамках консорциума по созданию металлогидридных систем хранения тесно сотрудничали три ведущие организации: ИАЭ им. И. В. Курчатова, НАМИ и МГУ им. М. В. Ломоносова. Инициатива создания такого консорциума при-

надлежала академику Легасову В. А. Институт атомной энергии им. И. В. Курчатова был головным разработчиком металлогидридной системы хранения водорода на борту автомобиля. Руководителем проекта был Чернилин Ю. Ф., активными участниками работ были Удовенко А. Н. и Столяревский А. Я.



Рис. 6. Бензоводородный автопогрузчик



Рис. 7. Бензоводородный автомобиль «Волга»



Рис. 8. Семененко К. Н. (слева) и Легасов В. А. (справа)

Металлогидридные соединения разработал и изготовил в необходимом количестве Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова. Эта работа велась под руководством Семененко К. Н., заведующего кафедрой химии и физики высоких давлений. 21 ноября 1979 г. были зарегистрированы в Государственном реестре изобретений СССР заявки № 263140 и № 263141 с приоритетом изобретения 22 июня 1978 г.

Авторские свидетельства на сплавы-аккумуляторы водорода А.С. №722018 и №722021 от 21 ноября 1979 г. были одними из первых изобретений в этой области в СССР и в мире. В изобретениях предлагались новые составы сплавов, позволяющих существенно увеличить количество запасаемого водорода. Это достигалось путем модификации состава и количества ком-

понентов в сплавах на основе титана или ванадия. Такие композиции позволили добиться концентрации 2,5...4,0 масс. % водорода. Выделение водорода из интерметаллида осуществлялось в интервале температур 250...400 °С. Этот результат и по сей день является практически максимальным достижением для сплавов такого типа. В разработке сплавов принимали участие ученые ведущих с то время научных организаций СССР, связанных с разработкой материалов и устройств на базе гидридов интерметаллических соединений и сплавов — МГУ им. М. В. Ломоносова (Семененко К. Н., Вербецкий В. Н., Митрохин С. В., Зонтов В. С.); НАМИ (Шатров Е. В., Раменский А. Ю.); ИПМаш АН СССР (Варшавский И. Л.); Завода-ВТУЗа при ЗИЛ (Гусаров В. В., Кабалкин В. Н.).

Компоновка металлгидридной системы хранения водорода на борту микроавтобуса РАФ 22034, работающего на БВТК, испытания системы проводились в Отделе двигателей на газовых и других видах альтернативных топлив НАМИ под руководством заведующего отделом Раменского А. Ю. Активное участие в работе принимали сотрудники отдела: Кузнецов В. М., Голубченко Н. И., Иванов А. И., Козлов Ю. А.

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ТОКСИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АВТОМОБИЛЬНОГО ДВС, РАБОТАЮЩЕГО НА БВТК В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

По отношению к бензину водород имеет в 3 раза большую теплотворную способность, в 13-14 раз меньшую энергию воспламенения и, что существенно для ДВС, более широкие пределы воспламенения топливно-воздушной смеси.

Такие свойства водорода делают его чрезвычайно эффективным для применения в ДВС, даже в качестве добавки [2-5].

В то же время к недостаткам водорода как топлива в чистом виде можно отнести падение мощности ДВС по сравнению с бензиновым аналогом. Очень «жесткий» процесс сгорания водородно-воздушных смесей в области стехиометрического состава приводит к детонации на режимах высоких нагрузок. Эта особенность водородного топлива требует существенных изменений конструкции ДВС.

В этой связи наиболее целесообразна организация топливоподачи БВТК таким образом, чтобы на режимах холостого хода и частичных нагрузок двигатель работал на топливных композициях с высоким содержанием водорода. По мере возрастания нагрузок концентрация водорода должна снижаться, и на режиме полного дросселя подачу водорода необходимо прекратить. Это позволит сохранить мощностные характеристики двигателя на прежнем уровне.

На рис. 9 и 10 представлены графики изменения экономических и токсических характеристик бензинового двигателя с рабочим объемом 2,45 л и степенью сжатия 8,2 единицы от состава бензино-водородо-воздушной смеси и концентрации водорода в БВТК.

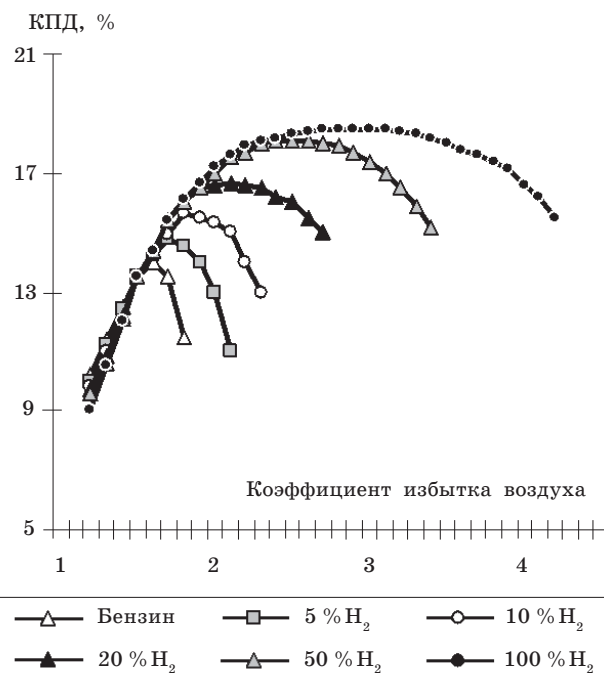


Рис. 9. Регулировочные характеристики двигателя по составу смеси при работе двигателя на БВТК ($N_e = \text{const}$, $n = \text{const}$)

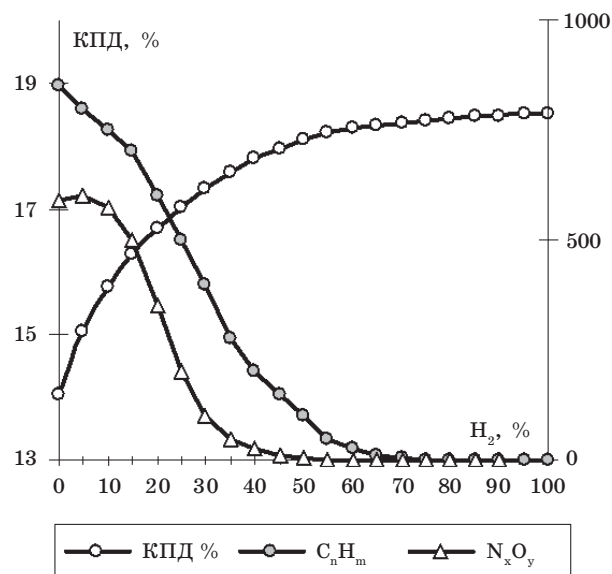


Рис. 10. Влияние добавки водорода на экономические и экологические показатели ДВС

Регулировочные характеристики двигателя по составу смеси при постоянной мощности $N_e = 6,2$ кВт и частоте вращения коленчатого вала $n = 2400$ об/мин дают возможность представить, как меняются показатели двигателя при работе на водороде, БВТК и бензине. Мощностные и скоростные показатели двигателя для испытаний выбраны таким образом, чтобы они наиболее полно отражали условия эксплуатации автомобиля в городских условиях. Мощность двигателя $N_e = 6,2$ кВт и частота вращения коленчатого вала $n = 2400$ об/мин соответствуют движению легкового автомобиля «Волга» с постоянной скоростью 60 км/час по горизонтальной ровной дороге.

Как видно из графиков, по мере увеличения концентрации водорода в БВТК эффективный КПД двигателя возрастает. Максимальное значение КПД при мощности 6,2 кВт и частоте вращения коленчатого вала 2400 об/мин достигает на водороде 18,5 %. Это в 1,32 раза выше, чем при работе двигателя на этой же нагрузке на бензине. Максимальное значение эффективного КПД двигателя при работе на бензине составляет на этой нагрузке 14 %. При этом состав смеси, соответствующий максимальному КПД двигателя (эффективный предел обеднения), смещается в сторону бедных смесей. Так, при работе на бензине эффективный предел обеднения топливно-воздушной смеси соответствовал коэффициенту избытка воздуха (α), равному 1,1 единицы. При работе на водороде коэффициент избытка воздуха, соответствующий эффективному пределу обеднения топливно-воздушной смеси $\alpha = 2,5$. Не менее важным показателем работы автомобильного двигателя внутреннего сгорания на частичных нагрузках является токсичность отработавших газов (ОГ). Исследование регулировочных характеристик двигателя по составу смеси на БВТК с различными концентрациями водорода показали:

1). по мере обеднения смеси концентрация окиси углерода (СО) в отработавших газах снижалась практически до нуля не зависимо от вида топлива;

2). увеличение концентрации водорода в БВТК приводит к существенному снижению выброса с отработавшими газами углеводородов C_nH_m . Минимальная концентрация углеводородов при работе на бензине соответствовала на этом режиме 900–800 ppm. При работе на водороде концентрация этого компонента падала до нуля;

3). образование окислов азота N_xO_y , как известно, не связано с родом топлива. Их концентрация в ОГ определяется температурным режимом горения топливно-воздушной смеси. Возможность работы двигателя на водороде и БВТК в диапазоне бедных составов смесей позволяет снизить максимальную температуру цикла в камере сгорания ДВС. Это существенно уменьшает концентрацию окислов азота в ОГ. При обеднении топливно-воздушной смеси свыше $\alpha = 2$ концентрация N_xO_y снижается до нуля.

Испытание микроавтобуса на стенде с беговыми барабанами при работе на БВТК по циклу ОСТ 037.001.054.-74 показали существенное улучшение экономических и токсических характеристик двигателя.

В случае работы двигателя на БВТК имело место улучшение экономических и токсических показателей двигателя. Результаты представлены в табл. 1. Расход бензина при испытаниях на стенде с беговыми барабанами по циклу ОСТ 037.001.054-74 снизился в 2,6 раза. При этом топливная экономичность, выраженная в кДж/км, по сравнению с испытаниями на бензине увеличилась в 1,28 раза. Расход водорода составил 1,65 кг на 100 км. Выброс токсичных компонентов по СО снизился в 23 раза, по C_nH_m в 2,9 раз, по N_xO_y в 5,3 раза.

Таблица 1

Показатели микроавтобуса с ДВС (рабочий объем 2,45 л., степень сжатия 8,2 единицы) при испытаниях на стенде с беговыми барабанами по циклу ОСТ 37001.57-74 на бензине и БВТК

№ п/п	Наименование параметров	Серийный автомобиль	Автомобиль на БВТК
1	Содержание СО, г/испытание	88,00	3,93
2	Содержание C_nH_m , г/испытание	7,70	2,67
3	Содержание N_xO_y , г/испытание	12,00	2,3
4	Расход бензина, кг/100 км	13,50	5,18
5	Расход водорода, кг/100 км	—	1,65
6	Средняя концентрация водорода, %	—	24,00
7	Суммарный расход топлива в кДж/км	5940	4260

При этом следует учесть, что реальные условия эксплуатации автомобилей в городских условиях, например в Москве, менее жесткие, чем при испытаниях автомобиля на стенде с беговыми барабанами в соответствии с циклом ОСТ 37001.57-74. Улучшение эффективного КПД двигателя на частичных нагрузках может при определенных условиях сделать применение БВТК экономически оправданным даже без учета улучшения токсических характеристик автомобиля.

ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ ВОДОРОДА НА АВТОМОБИЛЕ В КАЧЕСТВЕ ДОБАВКИ К ОСНОВНОМУ ТОПЛИВУ

По данным компании L-B-Systemtechnik GmbH, представившей на сайте www.h2mobility.org историю развития водородной автомобильной техники в настоящее время насчитывается более 200 типов автомобилей и автобусов, работающих на водороде. При этом треть из них оснащена двигателями внутреннего сгорания, две трети — энергоустановками на топливных элементах.

Несмотря на то, что долгосрочные перспективы применения водорода в качестве топлива для массовых автомобилей, по-видимому, связаны с применением топливных элементов, сегодня этот процесс сдерживается высокой стоимостью топливных элементов и отсутствием необходимого подтвержденного ресурса в условиях реальной эксплуатации. Вероятнее всего, широкое применение водорода начнется на существующих городских автомобилях с двигателем внутреннего сгорания и в первую очередь, в качестве добавки к бензину. Это обусловлено, на наш взгляд, рядом особенностей.

Первой такой особенностью является возможность улучшить показатели двигателя внутреннего сгорания на частичных нагрузках, наиболее характерных для эксплуатации автомобиля в городских условиях. Добавка водорода, даже в небольших количествах, позволяет существенно улучшить экономические и токсические характеристики автомобиля на этих режимах эксплуатации [5–7]. Водород имеет ряд преимуществ

ществ перед другими известными моторными топливами. Эти преимущества связаны с широкими пределами воспламенения водородно-воздушных смесей, что позволяет работать ДВС в режиме холостого хода и при малых нагрузках и на сверхбедных смесях.

Вторым фактором, способствующим продвижению водорода как добавки к бензину, является простота решения задач, связанных с переоборудованием автомобилей для работы на БВТК. Для такого переоборудования бензиновых автомобилей на бензоводородные топливные композиции может быть использована газобаллонная аппаратура, широко применяемая на автомобилях, работающих на сжатом природном газе. Бензоводородные автомобили, по сравнению с водородными, требуют бортовые системы хранения водорода с меньшими массогабаритными показателями. Для этого могут использоваться существующие облегченные баллоны на основе стеклопластика, а также перспективные металлогидридные системы хранения водорода.

Третьей особенностью применения БВТК является возможность в самое ближайшее время организовать эксплуатацию водородных автомобилей. Это позволит начать создавать городскую инфраструктуру водородной экономики, включая системы производства, хранения и транспортировки водорода, а также создание водородных заправочных станций и сервисных центров по техническому обслуживанию водородной автомобильной техники.

Следует заметить, что в России сегодня нет ни одной водородной автомобильной заправочной станции. В Европе построено несколько дорогостоящих водородных станций, использующих технологию щелочного электролиза воды. Такие станции, например, в Тулузе (Франция), Мальме (Швеция), Берлине (Германия) созданы в рамках европейских проектов для испытаний экологически чистых автобусов на топливных элементах [8].

В связи с этим возникает закономерный вопрос: где взять наиболее дешевый водород, например в г. Москве?

Потенциальные источники водорода со стоимостью, позволяющей организовать его экономически обоснованное применение на автотранспорте в г. Москве, можно разделить на две основные части:

— конверсия природного газа — наиболее дешевая, но менее гибкая технология получения водорода, также требующая дополнительной его очистки;

— электролиз воды — более гибкая технология, позволяющая получать чистый водород на месте потребления, но с более высокими энергозатратами;

Проведенный нами технико-экономический анализ показал, что одним из источников относительно дешевого водорода может стать более полное использование существующего электролизного оборудования ТЭЦ г. Москвы и более низкого тарифа на электроэнергию в ночное время.

В Москве на девяти крупных тепловых электрических станциях используется газообразный водород для охлаждения турбогенераторов. Здесь его получают с использованием щелочных электролизеров СЭУ-10 и СЭУ-20 ОАО «Урал-химмаш» (производительностью, соответственно, 10 и 20 $\text{нм}^3/\text{час}$). Эти установки имеют срок службы 10 лет и установленный ресурс до капитального ремонта не менее 24000 ч [9]. Многие из них надежно работают сегодня и сверх установленного срока. Однако следует учитывать технические решения, заложенные в эти установки — это разработки 50-х годов. Поэтому по таким параметрам, как металлоемкость и удельные энергозатраты ($\sim 5,5 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{нм}^3\text{H}_2$), они значительно уступают современным электролизным установкам ($4,1\text{--}4,3 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{нм}^3\text{H}_2$). Специфика использования водорода для охлаждения турбогенераторов на ТЭЦ заключается в том, что нет необходимости в непрерывном получении водорода, в то время как сами электролизеры лучше работают в непрерывном базисном режиме и требуют дополнительных технологических процедур при пуске и остановке. Таким образом, речь идет о более полном и эффективном использовании дорогостоящего оборудования и снижении срока его окупаемости. Используя выгодные тарифы, законодательно установленные государством, такие генерирующие предприятия могли бы стать производителями относительно дешевого водорода. Для этого необходимо создать на их базе водородные станции, включающие помимо электролизера, компрессор, накопительную систему хранения водорода в баллонах высокого давления и заправочные колонки, а также решить нормативно-правовые вопросы, связанные с появлением нового вида деятельности ТЭЦ и нового коммерческого продукта — газообразного компримированного водорода.

Рассмотрим два варианта возможного использования ресурсов ТЭЦ для получения водорода для автомобильного транспорта.

Вариант1

Электролизер эксплуатируется за пределами срока его амортизации. При расчете себестоимости произведенного водорода учитывается стоимость приобретаемого компрессора и заправочной колонки для коммерческого отпуска компримированного водорода. Приняты удельные энергозатраты с учетом компримирования — $6 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{нм}^3\text{H}_2$.

Вариант2

При расчете себестоимости произведенного водорода учитываются амортизация приобретаемого импортного электролизного оборудования производительностью 10 $\text{нм}^3/\text{час}$, компрессора и заправочной колонки. Приняты удельные энергозатраты с учетом компримирования — $4,8 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{нм}^3\text{H}_2$.

В расчетах использовался двухставочный тариф на электроэнергию — 50 коп./кВт·ч, установленный в 2006 г. для предприятий Мосгорэнерго» [10]. В табл. 2 и 3 приведены расчеты структуры расходов при производстве водорода на ТЭЦ, расчет себестоимости произведенного

Таблица 2
Структура расходов при производстве водорода на ТЭЦ

№ п/п	Статьи расходов	Структура расходов, %	
		Вариант 1	Вариант 2
1	Амортизация приобретаемого оборудования (срок амортизации 10 лет)	34,8	50,4
2	Обслуживание	13,9	20,1
3	Электроэнергия (электролиз и компримирование)	36,6	13,5
4	Вода	5,5	2,5
5	Текущий ремонт	3,5	5,1
6	Прочие расходы	5,7	8,4
	Итого годовые эксплуатационные расходы	100	100

Таблица 3
Себестоимость и срок окупаемости оборудования для производства водорода на ТЭЦ

№ п/п	Экономические показатели заправочной станции	Вариант 1		Вариант 2	
1	Себестоимость 1 кг водорода	91 руб.	2,7 евро	198 руб.	5,8 евро
2	Срок окупаемости закупленного оборудования при отпускной цене 272 руб/кг (8 евро/кг), лет	1,75		—	
3	Срок окупаемости закупленного оборудования при отпускной цене 204 руб/кг (6 евро/кг), лет	2,82		13,3	

водорода по двум вариантам, а также срок окупаемости приобретаемого оборудования.

Анализ табл. 2 показывает, что амортизационные отчисления закупаемого оборудования составляют значительную долю в общей себестоимости в рассматриваемых вариантах (соответственно около, 35 % и 50 %). При использовании существующего на ТЭЦ оборудования станции (вариант 1) себестоимость произведенного водорода составит 91 руб./кг H_2 . При этом срок окупаемости приобретенного дополнительного оборудования при отпускной цене компримированного водорода 6 евро/кг составляет 2,82 г., а при отпускной цене водорода 8 евро/кг — 1,75 г. Учитывая, что стоимость газобаллонного водорода в Москве (без учета его доставки) сегодня составляет 440 руб/кг (13 евро/кг), такая отпускная цена является, видимо, предельной. Таким образом, вариант 1 имеет экономически обоснованную реализацию, а для реализации варианта 2 требуются целевые инвестиции.

Следует отметить, что если потребителем является автомобильный транспорт, то и стоимость водорода может быть снижена за счет организации заправки непосредственно у ТЭЦ.

В настоящее время авторами на инициативной основе уже проведен комплекс работ для реализации этого проекта, в частности:

— переоборудован для использования на БВТК микроавтобус ГАЗель (рис. 11) и бортовая ГАЗель (рис. 12). Эти автомобили демонстрировались на выставках в рамках Международного Форума «Водородные технологии для производства энергии» (г. Москва, 6–10 февраля 2006 г.) и X-го Санкт-Петербургского экономического форума (13–15 июня 2006 г.). В подготовке автомобилей принимали участие также ряд организаций, такие как: «Автокомбинат № 41» г. Москвы, Исследовательский центр им. М. В. Келдыша, MGI «Аудит-Премьер»;

— разработана бензоводородная система питания двигателя автомобиля;

— проведены первые ходовые испытания таких автомобилей;

— в настоящее время с привлечением ряда организаций создается водородная заправочная станция производительностью 4–8 $nm^3 H_2$ /час.



Рис. 11. Бензоводородный микроавтобус ГАЗель на Международном Форуме в Москве (февраль 2006 г.)



Рис. 12. Бензоводородная бортовая ГАЗель. Пробег «Москва – Санкт-Петербург» на выставку в рамках X-го Международного Экономического форума (июнь 2006 г.)

Технико-экономический расчет такой электролизной водородной заправочной станции с учетом только затрат на электроэнергию (без учета стоимости оборудования и обслуживания), представлен в табл. 4. Расчеты показывают, что перевод автобуса на БВТК в условиях городской эксплуатации может быть экономически оправданным. В расчете принято: суточный пробег автомобиля — 200 км, расход водорода и бензина на 100 км, соответственно, 1,65 кг и 5,3 кг.

Таблица 4

Технико-экономические показатели водородной заправочной станции по критерию «энергозатраты»

Производительность станции, $\text{нм}^3 \text{H}_2/\text{час}$	Ночной тариф (23 ⁰⁰ –7 ⁰⁰)		Дневной тариф (7 ⁰⁰ –23 ⁰⁰)		Смешанный (8 ч — ночь, 12 ч — день)	
	Производство H_2 , кг	Количество автомобилей, шт.	Производство H_2 , кг	Количество автомобилей, шт.	Производство H_2 , кг	Количество автомобилей, шт.
4	2,88	1	5,76	2	7,2	2–3
10	7,2	2–3	14,4	4–5	18	5–6
40	28,8	8–9	57,6	17–18	72	21–22
Стоимость электроэнергии для производства 1 кг H_2 , евро	0,6		2,46		1,69	

Примечание:

¹ при условии работы эксплуатации автомобиля в городских условиях при пробеге 200 км/день, расходе водорода 1,65 кг/100 км и 5,18 кг/100 км бензина при работе автомобиля на БВТК и расходе топлива при работе автомобиля на бензине — 13,5 кг/100 км

² при энергозатратах: на производство водорода — 4,3 кВт·ч/нм³ H_2 , компримирование до 20 МПа — 1,5 кВт·ч/нм³ H_2 , ночной тариф — 0,32 руб./кВт·ч, дневной тариф — 1,3 руб./кВт·ч

Серийный автомобиль при таких же условиях эксплуатации на бензине имеет расход 13,5 кг/100 км. Суммарные затраты электроэнергии на электролиз водорода и его компримирование до 20 МПа составляют 5,8 кВт·ч/нм³ H_2 . Для режима работы водородной станции в ночные часы (23⁰⁰–7⁰⁰) принят тариф в размере 0,32 руб./кВт·ч, в дневные — 1,30 руб./кВт·ч.

В табл. 5 приведены результаты расчета технико-экономических показателей микро-автобуса на БВТК.

С учетом того, что современный городской автомобильный транспорт, такой как такси, маршрутные такси, городские и пригородные автобусы имеют годовой пробег значительно больший, чем 40 тыс. км, перевод этих транспортных средств на БВТК позволит окупить затраты на переоборудование автомобиля и обеспечить экономическую эффективность уже в течение первого года эксплуатации (табл. 5).

Чтобы сохранить такие же экономические показатели при цене автомобильного бензина в 0,6 евро/л, стоимость водорода должна составлять 2 евро/кг.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Очевидно, что практическое внедрение альтернативных видов энергоносителей, позволяющих решить проблему замещения углеводородных топлив, будет проходить поэтапно, в том числе и на автомобильном транспорте. Важным этапом в освоении водорода может стать практическое использование его на существующих автотранспортных средствах в качестве добавки к существующим моторным топливам. Такое использование водорода, например на автотранспортных предприятиях, уже сегодня может дать не только экономический эффект, но и решить экологические проблемы, особенно в крупных мегаполисах. Расширение рынка автотранспортных услуг малотоксичными автомобилями, работающими на водородсодержащих топливных композициях, позволит начать формировать инфраструктуру водородных автотранспортных комплексов, накапливать опыт технического обслуживания таких автомобилей, приведет к развитию сети заправочных станций.

Таблица 5

Технико-экономические показатели микроавтобуса на БВТК

№ п/п	Наименование параметров	Серийный автомобиль	Автомобиль на БВТК
1	Стоимость удорожания автомобиля при его переоборудовании для работы на БВТК, евро	0	1200
2	Эксплуатационный расход бензина, кг/100 км	13,5	5,18
3	Эксплуатационный расход водорода, кг/100 км	0	1,65
4	Стоимость бензина из расчета 1 евро/л (1,37 евро/кг), евро/100 км	18,5	7,10
5	Стоимость водорода из расчета 5 евро/кг, евро/100 км	0	8,25
6	Суммарная стоимость топлива, евро/100 км	18,5	15,35
7	Пробег автомобиля, при котором экономия затрат на топливо компенсирует затраты на переоборудование автомобиля, км	—	40 000

Список обозначений

ДВС — двигатель внутреннего сгорания
 H_2 — водород
БВТК — бензинводородные топливные композиции
СО — окись углерода
 C_nH_m — углеводороды
 N_xO_y — окислы азота
ОГ — отработавшие газы

Список литературы

1. Гусев А. Л., Дядюченко Ю. П. Применение водорода в автомобильных двигателях внутреннего сгорания в блокаде Ленинграда. // Сб. тез. докладов II Межд. симп. «Безопасность и экономика водородного транспорта», г. Саров, 2003 г., С. 11–13.
2. Шатров Е. В., Раменский А. Ю., Кузнецов В. М. Исследование мощностных, экономических и токсических характеристик двигателя, работающего на бензинводородных смесях. // Автомобильная промышленность, 1979. № 11.
3. Раменский А. Ю. Исследование рабочих процессов автомобильного двигателя на бензинводородных топливных композициях. Кандидатская диссертация. 1982 г. Москва.
4. Озерский А. С., Кузнецов В. М., Раменский А. Ю. и др. Авторское свидетельство № 918483. «Система питания карбюраторного двигателя внутреннего сгорания жидким и газообразным топливом». Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений СССР 07.12.1981 г.
5. Мищенко А. И., Белогуб А. В., Савицкий В. Д. и др. Применение водорода для двигателей автомобильного транспорта // Атомно-водородная энергетика и технологии. Сб. статей Вып. 8. М.: Энергоатомиздат, 1988 г.
6. Раменский А. Ю., Шелищ П. Б., Нефедкин С. И. и др. Применение водорода на автомобильном транспорте: перспективы на российском рынке. // Труды Межд. симп. по водородной энергетике. Москва, 1–2 ноября 2005 г. МЭИ. С. 169–174.
7. Раменский А. Ю., Шелищ П. Б., Нефедкин С. И. и др. Перспективы и ближайшие задачи использования водорода в автомобиле на Российском рынке. // Межд. форум «Водородные технологии для производства энергии». Тез. докладов. 6–10 февраля 2006 г. Москва. С. 221–222.
8. С. Machens. The European renewable hydrogen production and refuelling station projects. // Труды Межд. симп. по водородной энергетике. Москва, 1–2 ноября 2005 г., МЭИ. С. 39–42.
9. Кулешов Н. В., Коровин Н. В., Терентьев А. А., Рыжиков А. В. Отечественные электролизеры-необходимая составляющая водородной энергетики России. // Труды Межд. симп. по водородной энергетике. Москва, 1–2 ноября 2005 г. МЭИ. С. 156–163.
10. Постановление РЭК г. Москвы от 06.12.05. № 85. Тарифы на электрическую энергию, реализуемую ОАО «Мосэнергосбыт» потребителям города Москвы в 2006 году.