**Водородное топливо для автотранспорта**

Н.Г. Кириллов, доктор технических наук (ООО «Инновационно-исследовательский центр "Стирлинг-технологии"»)

С 2001 г. в промышленно развитых странах анонсированы и приняты крупные государственные программы НИОКР в области водородной энергетики. На реализацию программ «Freedom CAR» и «Freedom Fuel», выдвинутых президентом США Дж. Бушем, уже выделено около 2 млрд. долл. Японское правительство планирует израсходовать 4 млрд. долл. государственных средств для реализации проекта «WE-NET». Программы стран ЕС предусматривают бюджетное финансирование НИОКР в области водородной энергетики в размерах более 200 млн. евро в год. Данные программы рассчитаны на период до 2020 г. и нацелены на уменьшение зависимости развитых стран от импорта энергоресурсов, решение комплекса экологических проблем, развитие новых технологий по использованию возобновляемых энергоресурсов. В перспективе это приведет к существенным изменениям топливно-энергетического баланса и формированию нового крупного международного рынка водородных технологий и энергоносителей, что будет иметь значительные социально-экономические и политические последствия для всего мира.

Основным направлением внедрения водородной энергетики является автотранспорт, поскольку обостряется проблема устойчивого обеспечения его моторным топливом. Этому есть несколько причин. Первая из них — истощение запасов нефти. По прогнозам комиссии ЮНЕСКО, уже в первой четверти наступившего столетия в значительной мере будут исчерпаны разведанные запасы нефти. По данным Энергетической комиссии США, за последние 20 лет в мире не было открыто ни одного нового крупного месторождения нефти. При этом необходимо помнить, что в странах ОПЕК из-за стремления увеличить квоты на добычу нефти примерно на треть завышены объемы ранее разведанных ее месторождений.

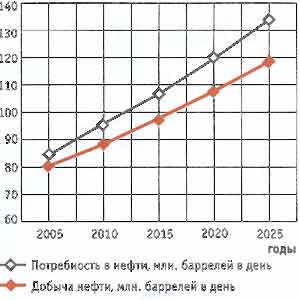
Каждую секунду во всем мире добывается и потребляется (химической промышленностью, автомобилям и т.д.) примерно 127 т нефти. По расчетам ОПЕК, при существующем уровне добычи нефть в Великобритании закончится в ближайшие 3-4 года, в Норвегии — во втором десятилетии XXI в., в США — уже в первом десятилетии. Истощение месторождений российской нефти прогнозируется на 20-е гг. Нефтяных запасов Ирана, Саудовской Аравии, Венесуэлы хватит только до 50-х гг. нашего столетия.



Прогнозируемое изменение уровня автомобилизации в первой четверги населения XXI в.

Второй причиной обострения проблемы является увеличение количества автотранспортных средств. Сегодня эксплуатируется около 700 млн. автомобилей, которые потребляют более 60% всей добываемой нефти. Каждые две секунды в мире с конвейера сходит новый автомобиль, и к 2015 г. их количество вплотную приблизится к отметке в один миллиард единиц. Всем этим машинам потребуется бензин или дизельное топливо. По прогнозам специалистов, для удовлетворения всех нужд потребление нефти должно возрасти до 190 т в секунду. В то же время мировая нефтяная промышленность уже сегодня не в состоянии увеличить объем добычи нефти для компенсации стремительного прироста автомобильного транспорта (рис.1).

В мире не хватает около 4 млн. баррелей нефти в день, что привело к беспрецедентному росту цен на нефть. Баррель нефти стоит более 60 долл., а к концу 2006 г. ожидается увеличение его стоимости до 100 долл. К 2025 г. дефицит нефти прогнозируется до 20 млн. баррелей в день, что, очевидно, приведет к непредсказуемому росту цен. К середине 30-х гг. XXI в. традиционные нефтяные топлива станут непомерно дорогими, а к 2050 г. полностью исчезнут. График роста дефицита нефти в мире представлен на рис. 2.



Рост дефицита нефти по миру в целом

Аналогичные тенденции характерны и для нашей страны. В России продолжается рост цен на нефтяные виды моторного топлива. В 2002 г. цены на бензин выросли на 32%, на дизельное топливо — на 15%, в 2003 г. — на 36% и 16%, соответственно. К началу 2005 г. уровень цен на бензин в России вплотную приблизился к ценам в США и других развитых странах. Очевидно, что и в дальнейшем тенденция роста цен на нефтепродукты будет сохраняться.

Транспортный сектор Европы, Японии и США на 90% зависит от нефти. В связи с увеличением энергопотребления и истощением разведанных запасов нефти перед развитыми странами мира стоит задача диверсифицировать свои топливно-энергетические балансы в сторону максимально возможного замещения в транспортном секторе нефтепродуктов другими видами энергоносителей. Наиболее реальные альтернативные варианты — сжиженный природный газ (СПГ) или жидкий водород (ЖВ). Они более экологичны, а СПГ еще и дешевле. Сейчас качественный бензин в России стоит минимум 20 тыс. руб. за 1 т, а СПГ — 8 тыс. руб. И этот разрыв будет расти. Учитывая, что запасы природного газа на Земле иссякнут к середине 70-х гг. нашего столетия, можно с уверенностью сказать, что водород явится одним из наиболее перспективных вариантов моторного топлива XXI в.

Его ресурсы огромны. В процессе его сгорания образуется водяной пар, поэтому он является самым экологически чистым видом моторного топлива. Токсичные окислы азота содержатся в выхлопе водородного двигателя в количествах, неизмеримо меньших по сравнению с бензиновыми моторами и тем более с дизельными. Они легко обезвреживаются в каталитических нейтрализаторах.

Понимая перспективность разработки водородного топлива, правительства США, Европейского Союза, Японии и других стран уже сейчас тратят миллиарды долларов на научные исследования и опытно-конструкторские работы, стремясь как можно скорее разработать промышленные технологии и внедрить их на рынке.

Одним из серьезных вопросов в применении водорода в качестве моторного топлива является выбор способа его хранения на борту автотранспортного средства. Водород — самый легкий среди химических элементов, поэтому в заданном объеме его помещается значительно меньше, чем топлива других видов. При комнатной температуре и нормальном атмосферном давлении водород занимает примерно в 3000 раз больший объем, чем бензин с равным количеством энергии. Поэтому для того, чтобы заправить машину достаточным количеством топлива, необходимо либо нагнетать водород под высоким давлением, либо использовать его в виде криогенной жидкости, либо же оборудовать автомобили сложнейшими топливными системами.

Обеспечение автозаправочных станций сжатым водородом и заполнение баллонов, находящихся в автомобиле, технически больших проблем не представляет. Современные материалы гарантируют высокую надежность таких сосудов. Однако увеличивается вес автомобиля и уменьшается полезное пространство, так как баллон с 1 кг сжатого при 70 МПа водорода занимает в 7.5 раз больше места, чем энергетически эквивалентное количество бензина.

В сжиженном виде водород занимает значительно меньше места, но для этого его необходимо охладить до температуры на двадцать градусов выше абсолютного нуля. Успехи, достигнутые в сфере развития криогенных технологий и использования сверхнизких температур, уже сегодня позволяют без особого ущерба полезному пространству автомобиля хранить на его борту запас жидкого водорода, достаточный для пробега 500 км и более. Достоинством данной системы хранения является наименьшая масса и высокая объемная концентрация водорода. Жидкий водород по энергетическому эквиваленту соответствует газообразному, сжатому до 170 МПа. Поэтому если к системе хранения водорода предъявляются ограничения по массе и по объему, что характерно для транспортных средств, то преимущество имеет криогенная система хранения.

Жидкий водород, производство которого растет в мире ежегодно на 5%, является важным элементом инфраструктуры снабжения потребителей. В США производственные мощности позволяют в год получать до 120 тыс. т жидкого водорода, из которых 15% расходуется на обеспечение ракетно-космической отрасли, остальное используется в химической промышленности (37%), металлургии (21%), электронике (16%), стекольной промышленности (4%).

Благодаря своим массовым и объемным характеристикам, а также уровню безопасности, криогенная система хранения водорода на борту транспортного средства более предпочтительна по сравнению с гидридной и системой хранения водорода в сжатом виде. И большинство автомобильных фирм идут по этому пути.

В начале 2004 г. два крупнейших автопроизводителя «General Motors Corp» и «BMW Group» объявили о намерении приступить к совместной разработке оборудования, предназначенного для заправки автомобилей жидким водородом. В Германии планируется построить до 10 тыс. криогенных водородных заправочных станций. В рамках Европейского объединенного водородного проекта(European Integrated Hydrogen Project (EIHP)) обсуждаются спецификации для такого оборудования. Они явятся основой стандарта Европейской экономической комиссии ООН для работающих на водороде автомобилей.

В середине 1990-х гг. многие автомобильные компании обратили свой взор на электромобили с топливными элементами (ТЭ), обладающими значительными преимуществами перед тепловыми двигателями, поскольку они не имеют движущихся частей и в них не происходит горения водорода. Внутри топливных элементов (или ячеек, как их иногда именуют) водород разлагается на разноименно заряженные ионы и электроны. Именно электроны и превращаются в полезный электрический ток, питающий цепь бортовой силовой установки. Ионы водорода связываются кислородом, который в составе обычного воздуха подается внутрь топливного элемента, образуя выхлоп — водяной пар.

Позже выяснилось, что топливные элементы обладают рядом серьезных недостатков. И, прежде всего, высокой стоимостью и коротким сроком службы. Эффективность лучших японских топливных элементов в настоящее время составляет менее 30%. Применение топливных элементов на транспортных средствах дает существенный прирост массогабаритных характеристик автомобиля.

Для массового применения топливных элементов в автотранспорте их стоимость должна быть снижена до 200 долл./кВт (при современной стоимости от 5 до 10 тыс. долл./кВт), что определяется уменьшением расхода платиновых металлов, применяемых в качестве катализаторов, и снижением стоимости используемых в качестве мембран срторированных и перфорированных пленок. Поскольку решение большинства из описанных выше проблем требует революционных научных открытий, многие зарубежные исследователи, например куратор исследовательской программы в области водородного топлива Министерства энергетики США Пит Девлин, подвергают сомнению целесообразность курса на создание дорогостоящих демонстрационных проектов автомобилей с топливными элементами. По их мнению, технологии в создании топливных элементов достигли своих пределов, и они не видят возможности для их быстрого усовершенствования. Сегодня технология топливных элементов развивается, в основном,из-за перспектив по обеспечению нулевого уровня токсичности.

Более перспективным является другой путь внедрения жидкого водорода на автотранспорте — сжигание его в двигателе внутреннего сгорания (ДВС). Такой подход реализуется рядом ведущих автостроительных компаний, таких как, например, «BMW», «Ford» и «Mazda».

На «BMW» создан опытный автомобиль «745Н», в двигателе которого сжигается водородное горючее. Жидкий водород запасается в криогенном баке. Специальными электронноуправляемыми форсунками газ подается в цилиндры. При сильном обеднении водородновоздушной смеси (в 2 с лишним раза против стехиометрического состава) в камерах сгорания почти не образуются вредоносные оксиды азота (канцерогены); другие загрязнители при сжигании водорода в воздушной среде не формируются вовсе. В атмосферу поступает один только водяной пар. В этой же компании создан самый быстрый на сегодняшний день автомобиль, работающий на водородном топливе (рис. 3). Модель, получившая обозначение «H2R», развивает скорость свыше 300 км/ч.

Перспективным представляется новое направление в двигателестроении на водородном топливе, основанное на применении двигателя Стирлинга. Этот двигатель до конца XX в. широко не применялся на автотранспорте из-за более сложной по сравнению с двигателем внутреннего сгорания конструкции, большей материалоемкости и стоимости. Однако в последнее время в ведущих мировых обзорах по энергопреобразующей технике двигатель Стирлинга рассматривается как обладающий наибольшими возможностями для дальнейшей разработки с целью применения водорода в качестве моторного топлива. Низкий уровень шума, большой ресурс, сравнимые размеры и масса, хорошие характеристики крутящего момента — все эти параметры дают возможность машинам Стирлинга в ближайшее время вытеснить двигатели внутреннего сгорания и топливные элементы в области водородной энергетики. Красноречивым примером подтверждения этого может являться практика создания рядом зарубежных фирм, таких как «ЧАСА», «Кокумс», «Мицубиси дзюкоге», анаэробных энергетических установок для космических летательных аппаратов и подводных лодок, в которых первоначально применяемые электрохимические генераторы на топливных элементах практически полностью были заменены на стирлинг-генераторы.

Достигнутые в настоящее время КПД в серийных и опытных образцах двигателей Стирлинга даже при умеренных температурах нагрева (600-700°С) представляются весьма внушительными цифрами — до 40%. В лучших зарубежных образцах двигателей Стирлинга удельная масса составляет 1.2-3 кг/кВт, а эффективный КПД до 45%.

Проблема замены традиционного моторного топлива жидким водородом выходит далеко за рамки задач, решаемых в автомобильной индустрии. Речь идет о новом технологическом укладе мировой экономики. По оценкам Джозефа Ромма, бывшего помощника министра энергетики США, скорее всего, автомобили, работающие на водороде, достигнут приемлемых экономических показателей (стоимость машины, стоимость одной заправки, уровень безопасности, количество вредных выбросов и т.д.) не ранее 2030 г. Изготовление водородного топлива для автомобилей ныне в 4 раза дороже, чем производство автомобильного бензина в количестве, достаточном для производства аналогичного количества энергии. Кроме того, остается проблемой создание «водородной инфраструктуры» — сети заправочных станций и сервисных центров, необходимых для обслуживания автомобилей, работающих на водородном топливе. По оценкам Аргоннской Национальной Лаборатории (Argonne National Laboratory), в масштабах США на эти цели требуется затратить более 600 млрд. долл.

В отчетах Американского физического общества и Национальной академии наук США говорится, что для реализации программы перевода транспорта на водородное топливо необходимо осуществить технологический прорыв. На сегодняшний день мировая энергетическая инфраструктура слишком хорошо развита, и, чтобы сделать водород конкурентоспособным по сравнению с традиционными видами топлива, необходимы большие капиталовложения.

По мнению автора, ориентировочные сроки внедрения водородной энергетики на транспорте могут быть следующие: США, Западная Европа, Япония — 2030 г., Россия, СНГ, страны-экспортеры нефти и природного газа — 2040-2050 гг.

Перевод транспорта на водород не может происходить директивно и быстро. Для такого революционного шага в условиях страны требуется кардинальная подготовка — от создания производства водорода до изменений в налоговой политике и экономического стимулирования применения альтернативного топлива. Сейчас во всех развитых страна мира приняты национальные программы такого перехода, но не непосредственно, а через энергетику, основанную на относительно более чистом топливе — природном газе (метане). Такие программы могут рассматриваться как промежуточный этап перехода к водородным технологиям и водородной экономике. Использование сжиженного природного газа подготовит переход к замене его водородом, поскольку для создания инфраструктуры производства, хранения и заправки СПГ, а затем и жидкого водорода, можно будет использовать в значительной мере однотипное криогенное оборудование.

Можно предположить, что внедрение альтернативных моторных топлив в Российской Федерации будет иметь следующие этапы:

I — 2007-2040 гг. Создание инфраструктуры производства и переход на применение СПГ;

II — 2035-2050 гг. Создание инфраструктуры производства, хранения и переход на применение сжиженного водорода.

В ближайшее время в стране необходимо создать криогенную инфраструктуру и поэтапно переводить автотранспорт на СПГ, а в перспективе — на жидкий водород. Учитывая, что на первоначальном этапе более перспективным моторным топливом является СПГ, технологические решения по созданию криогенных заправочных станций СПГ должны быть таковы, чтобы эти станции можно было при необходимости быстро и без лишних капитальных затрат модернизировать в криогенные заправочные станции жидкого водорода. Такие станции могут быть созданы на основе установок с применением криогенных газовых машин Стирлинга (КГМ).

КГМ Стирлинга относятся к ожижителям, действие которых основано только на внешнем охлаждении. Процесс ожижения газа идет при атмосферном давлении, без предварительного сжатия. Это позволяет делать установки компактными и простыми в обслуживании.

В условиях Российской Федерации использование криогенных машин Стирлинга позволяет разработать принципиально новую концепцию создания инфраструктуры заправочных станций криогенных моторных топлив для автомобильного транспорта. Предлагаемая для городских условий инфраструктура основана на разумном сочетании небольшого количества крупных муниципальных заправочных комплексов и многочисленных малогабаритных заправочных станций, расположенных непосредственно в гаражах автохозяйств. Основная нагрузка по обеспечению автотранспорта криогенным топливом должна ложиться именно на гаражные заправочные станции, а городские заправочные комплексы будут предназначаться только для дозаправки промышленного и общественного транспорта при его эксплуатации в черте города и междугородних перевозках. Специфика подхода к созданию такой инфраструктуры определяется особенностями криогенных топлив: их высокой испаряемостью, значительными потерями при транспортировке и заправке баков автотранспортных средств.

В настоящее время создан необходимый научно-технический и патентный задел, включающий в себя методологические основы расчета и технико-экономического обоснования криогенных гаражных заправочных станций, разработаны принципиальные схемы и технические решения, защищенные патентами РФ, что обеспечивает создание криогенной инфраструктуры СПГ и жидкого водорода в кратчайшие сроки. Компанией, ведущей разработки в этой области, является 000 «Инновационно-исследовательский центр "Стирлинг-технологии"». В начале 2006 г. планируется введение в опытно-промышленную эксплуатацию КриоАЗС на основе КГМ Стирлинга для заправки автотранспорта сжиженным природным газом на 41 автокомбинате г. Москвы. Данная КриоАЗС будет прототипом будущих гаражных заправочных станций жидкого водорода.