

Ю. В. Галышев – С.-Петербургский государственный политехнический университет

Современный уровень развития двигателестроения позволяет создавать надежные, достаточно мощные, экономичные и малотоксичные двигатели, работающие на водороде. В качестве промежуточного этапа могут рассматриваться варианты со смешанным водородно-бензиновым питанием, а также чисто водородные двигатели пониженной мощности.

Применение водорода в качестве моторного топлива

Первые опыты применения водорода в качестве моторного топлива относятся еще к 1920-м гг., когда газ, предназначенный для наполнения дирижаблей, использовался также для питания двигателей воздушного корабля. В период Великой Отечественной войны в Ленинграде, отрезанном от поставок жидкого топлива, отработавший в аэростатах водород успешно использовался для двигателей передвижных электростанций. Эксперименты по использованию водорода как моторного топлива проводились также в послевоенные годы, однако не получили развития главным образом из-за того, что практической потребности в замене нефтяных топлив в то время еще не было.

Интерес к этой тематике активизировался в 1970-80-е годы, что было в значительной степени связано с энергетическим кризисом, обусловленным сокращением поставок ближневосточной нефти. В этот период были проведены успешные разработки и созданы демонстрационные образцы автомобилей, работающих на водородном топливе. В настоящее время также ведутся работы в этом направлении. Например, фирма BMW планирует начать с 2010 года серийный выпуск автомобилей модели 750 hL с 12-цилиндровым двигателем мощностью 204 л.с., работающим на водороде (несколько автомобилей было изготовлено для выставки ЭКСПО '2000). Для хранения топлива используется криогенный бак с запасом, обеспечивающим пробег без дозаправки 320 км.

Водород можно было бы считать идеальным топливом, учитывая его высокую теплоту сгорания, неиссякаемые запасы, экологичность: выхлоп содержит только чистейший водяной пар (без оксидов углерода, сажи и дыма). Однако эти положительные свойства водорода при применении в качестве топлива имеют и обрат-

ную сторону. Прежде всего, хотя водород и является самым распространенным на Земле элементом, в свободном виде он отсутствует. Основное (по количеству) водородосодержащее вещество – вода. Для выделения из нее водорода требуется затратить такое количество энергии, которое превысит полученное при сжигании этого топлива в двигателе.

Теплота сгорания водорода в расчете на единицу массы действительно почти вдвое превышает соответствующую величину для жидких топлив. Но для сжигания 1 кг водорода требуется также почти вдвое больше кислорода. Следовательно, теплота сгорания единицы объема стехиометрической (содержащей минимально необходимое количество кислорода) водородовоздушной смеси даже ниже, чем у жидких и газообразных углеводородных видов топлива. То есть при внешнем смесеобразовании, типичном для бензиновых ДВС, и одинаковом КПД водородный двигатель даст почти на 20% меньшую мощность, чем бензиновый или газовый. Низкая теплота сгорания водородовоздушной смеси обусловлена большим удельным объемом водорода, поэтому если подавать водород в цилиндр после закрытия впускного клапана, то соотношение газов можно оптимизировать. Это предполагает хранение и подачу водорода под давлением и специальную конструкцию системы подачи топлива.

Наконец, тезис о полной безвредности выхлопа водородного двигателя также требует некоторой корректировки. Действительно, при сжигании водорода в кислородной среде образуется только водяной пар. Однако при сгорании водородовоздушных смесей, как и углеводородных топлив, окисляется атмосферный азот, образуя весьма вредные оксиды NO и NO₂. Их количество может оказаться даже выше, чем у

бензинового двигателя (при прочих равных условиях), в связи с более высокими температурами в зоне горения. К тому же, пока нет еще опыта наблюдений, связанных с интенсивным выбросом в атмосферу водяного пара. Следует также отметить неизбежный расход смазочного масла на угар.

Но несмотря на все это, преимущества водорода как топлива для транспортных двигателей очевидны. Более того, при условии исчерпания ресурсов ископаемых топлив «водородный» двигатель может оказаться, наряду с электродвигателем, единственной альтернативой. Уже сегодня такие двигатели (как и электромобили) могут применяться в ограниченном количестве в условиях предельно жестких ограничений на состав отработавших газов. Необходимо вести их разработки и исследования в расчете на перспективу, пусть даже отдаленную.

Однако прежде чем серийно производить транспортные средства, работающие на водороде, предстоит решить ряд серьезных проблем. В первую очередь, необходимо обеспечить производство водорода в достаточных количествах. В большинстве технологий, используемых для этой цели в химической промышленности, сырьем являются ископаемые топлива – природный газ, нефть. При этом затрачивается большое количество энергии, получаемой за счет части теплоты сгорания исходных углеводородов. В качестве сырья может использоваться также и уголь, но и в этом случае потери энергии больше, чем при получении коксового, светильного или генераторного газа (по своим «моторным» свойствам мало уступающих водороду). Кроме того, при восстановлении водорода из воды с помощью угля высвобождаемый кислород окисляет углерод, что приводит к образованию CO_2 – основного фактора парникового эффекта. Чтобы обеспечить водородным топливом значительный парк автомобилей, потребуется увеличить в несколько раз производство угля.

Универсальна и экологически безопасна технология получения водорода, основанная на электролизе воды. Правда, это предполагает наличие излишков электрической энергии, которых в глобальном понимании нет и не предвидится, поскольку энергопотребление растет быстрее, чем вводятся в строй новые электростанции. Однако в локальном аспекте такие излишки реально существуют – это прежде всего гидроэлектростанции и ядерные энергоустановки. Сложность регулирования мощности на таких электростанциях заставляет искать пути использования избыточной энергии в периоды снижения нагрузки, в частности в ночные часы. При условии достаточно широкого спроса эта энергия могла бы использоваться в производст-

ве водородного топлива. Еще один резерв связан с ядерными энергоустановками, где водород образуется в системах охлаждения реакторов.

Необходимо также решить вопрос о рациональных способах хранения водорода, предназначенного для использования в качестве топлива. Свободный водород, как и другие горючие газы, может храниться либо в сжатом, либо в сжиженном виде. Кроме того, существуют способы хранения в химически связанном виде, предусматривающие выделение водорода непосредственно на борту транспортного средства перед подачей в двигатель. Сравнение различных вариантов показано в *табл.* В качестве основного показателя для сравнения выбрана удельная энергоемкость – количество энергии, которое при 100-процентном использовании может быть получено в расчете на 1 кг массы системы хранения.

Как показывает *таблица*, из-за малой плотности водорода для хранения запаса, обеспечивающего получение равной работы с двигателем жидкого топлива, требуется значительно большая масса. В 1970-80-х гг., когда в распоряжении разработчиков были только стальные баллоны, вариант с хранением водорода в баллонах всерьез не рассматривался. А криогенный способ хранения в тот период еще не был доведен до уровня, допускающего его применение на автомобилях. Основное внимание обращалось на гидридные аккумуляторы и реакторы на основе гидрореагирующих сплавов.

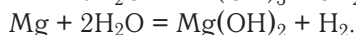
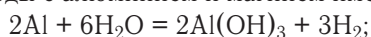
Первый вариант основан на способности водорода образовывать с металлами нестойкие соединения – гидриды. При определенных условиях эти соединения распадаются с высвобождением свободного водорода. Может использоваться, например, лантан-никелевый гидрид LaNi_5H_6 . Контейнер с этим гидридом, содержащий 0,5 кг водорода, имеет массу 40...45 кг. Следовательно, удельная энергоемкость такого бака 1100...1300 кДж/кг (как и у стального баллона).

Таблица. Удельная энергоемкость топлива в расчете на 1 кг массы системы хранения

Способ хранения или получения водорода		Удельная энергоемкость, кДж/кг
Газ под давлением в баллонах	стальных	1000...1200
	пластиковых и металлопластиковых	2000...2500
Жидкий водород в криогенном баке		6800...7200
Металлогидридный аккумулятор		1000...4000
Гидрореагирующие сплавы		3400...3800
Жидкое топливо		30 000

Более легкий магниевый гидрид Mg_2NiH_4 обеспечивает удельную энергоемкость порядка 4000 кДж/кг. Температура диссоциации этого гидрида составляет 287 °С, поэтому гидридный аккумулятор должен обогреваться отработавшими газами двигателя. При этом могут возникнуть трудности с подачей водорода при малых нагрузках, когда температура газов недостаточно высока.

Возможно также производство водорода на основе реакции воды с гидрореагирующими сплавами. Это сплавы легких металлов с присадками, обеспечивающими ускоренное протекание физико-химических процессов. Реакции воды с алюминием и магнием имеют вид:



Следовательно, для производства 1 кг водорода требуется 9 кг алюминия или 12 кг магния. Кроме того, в реакциях используется 18 кг воды на 1 кг водорода. Таким образом, удельная энергоемкость составит (без учета массы деталей, входящих в реакторную систему), соответственно, 3800 и 3400 кДж/кг.

Достоинством хранения водорода в химически связанном виде является высокая безопасность. Поскольку высвобождаемый водород немедленно сжигается в двигателе, то количество свободного газа в системах автомобиля, который образует с воздухом взрывоопасную смесь, — минимально.

В 1980-е годы в Ленинградском политехническом институте был проведен комплекс исследований по созданию моторных установок с применением реакторов на основе гидрореагирующих сплавов магния [1]. В результате этих работ были созданы работоспособные конструкции реакторов для стендовых и автомобильных моторных установок. Были детально исследованы особенности рабочих процессов двигателей на водородном топливе, проведен широкий комплекс испытаний экспериментального автомобиля. Магниевый сплав в виде стружки загружался в специальные сменные кассеты, которые затем устанавливались в реактор. Вода в дозированном количестве прокачивалась через реактор, а образующаяся пароводородная смесь осушалась в холодильнике. Затем почти чистый водород подавался во впускной коллектор двигателя.

В последние десятилетия достигнут значительный прогресс в технологиях хранения газообразного топлива, которые могут быть использованы и для водорода. Так, фирмой Diehl разработана многослойная конструкция, включающая внутреннюю алюминиевую втулку и чередующиеся слои кольцевой и винтовой пластиковой обмотки. На этой технологической

основе создана серия баллонов емкостью от 4 до 150 л, которые рассчитаны на рабочее давление 20 или 30 МПа. Отношение массы баллона к его емкости составляет около 0,6 кг/л.

В конструкции баллона фирмы Mannesman внутренняя часть выполнена из высоколегированной стали, а наружная представляет собой армирующую обмотку из волокнистого материала — его удельная прочность в десять раз выше, чем у стали. Рабочее давление здесь также составляет 20 или 30 МПа, объем — от 60 до 165 литров, а масса — от 46 до 110 кг, то есть удельные значения 0,6...0,8 кг/л.

Фирма Brunswick предлагает полностью пластиковый вариант, выполненный из трех слоев материалов с различными свойствами. По данным изготовителя, масса таких баллонов (при равных объемах и давлениях хранимого газа) меньше массы емкостей из армированного алюминия и армированной стали в 1,5 и 2 раза соответственно и почти в 4 раза — емкостей из цельностальных конструкций.

При хранении водорода в сжиженном виде показатели еще лучше. Например, общая масса криогенного бака ЦТП 0,09/1,2, вмещающего 90 л сжиженного газа, — 100 кг. Удельная теплота единицы массы в этом случае около 7000 кДж/кг, т.е. только в 4 раза меньше, чем для жидкого топлива. Однако при этом значительно возрастают энергозатраты на сжижение, поскольку температура жидкого водорода составляет около 20 К. В настоящее время разработаны и используются промышленные криогенные резервуары для более крупных установок — тепловозных, судовых, авиационных. Помимо повышенных энергозатрат, применение криогенного способа хранения требует решения такой проблемы, как использование или отвод испаряющегося газа при останове двигателя.

На практике применяются конструкции автомобильных моторных установок, основанные на применении как баллонных, так криогенных и гидридных систем.

Определенные трудности связаны с обеспечением равной мощности двигателя при работе на водороде и на бензине. Кроме того, отмечается способность водородосодержащих смесей к преждевременному воспламенению от нагретых деталей двигателя и горячих газов. При внешнем смесеобразовании преждевременное воспламенение приводит к «обратным вспышкам» смеси во впускном коллекторе, что достаточно опасно с точки зрения надежности и безопасности эксплуатации.

Специальными экспериментами установлена надежная корреляция между границей «хлопков» во впускном коллекторе и удельным количеством теплоты, подводимой при сгорании, на

единицу массы рабочего тела [2]. Было показано, что безопасность обеспечивается при коэффициенте избытка воздуха не менее 2. Таким образом, если не принять специальных мер, мощность двигателя на водороде будет примерно в 2,5 раза ниже, чем бензинового. Например, для двигателя ВАЗ-2111 номинальная мощность снижается с 52 до 27 кВт.

Для компенсации мощности существует несколько подходов. При сохранении внешнего смесеобразования с общим смесителем рациональным решением является дополнительная подача бензина на режимах, близких к номинальной мощности. Такой подход был реализован, в частности, при разработке системы подачи топлива для двигателя ВАЗ-2111 [3]. Одновременно при таких схемах можно уменьшить и необходимую массу системы хранения водорода. Но экономия жидкого топлива, а также уменьшение токсичности отработавших газов осуществляются лишь частично. Двигатель работает на чистом водороде только на режимах холостого хода и малых нагрузок. Если учесть, что на эти режимы приходится значительная часть времени эксплуатации и основная доля выброса оксидов углерода и несгоревших углеводородов, то и это уже прогресс по сравнению с бензиновым двигателем.

При реализации схем смешанного питания необходим обоснованный выбор рационального алгоритма регулирования состава смеси, который обеспечит минимальный расход бензина и предельно ограничит выброс в атмосферу токсичных продуктов сгорания. Такой выбор возможен на основе комплексного моделирования рабочего процесса, газообмена, температурного состояния и токсичности отработавших газов двигателя. При этом должны быть учтены вероятные отклонения в процессе горения, что, в свою очередь, позволит наметить пути их устранения.

На рис. 1 показано изменение максимально допустимой, при условии отсутствия «хлопков», мощности двигателя при различных составах бензоводородовоздушной смеси. Из графиков следует, что сохранение мощностных показателей базового бензинового двигателя возможно лишь при соотношении массовых расходов водорода и бензина не более 5%. Этот результат полностью согласуется с данными ранее проводившихся экспериментальных исследований.

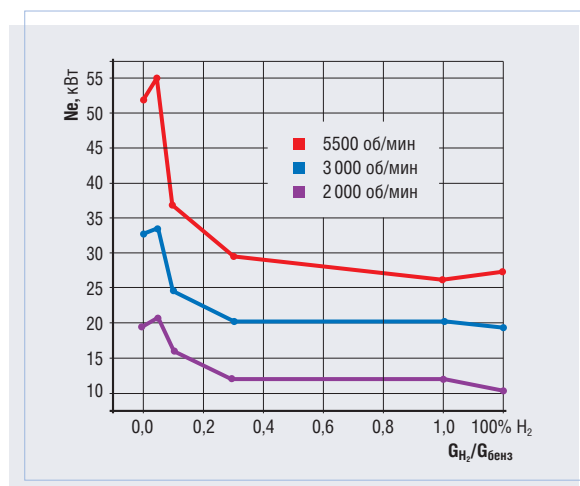
Все сказанное относится к традиционным системам смесеобразования – карбюраторным или системам с непрерывным впрыском топлива во впускной коллектор. Более современные схемы значительно облегчают проблемы, связанные с опасностью «хлопков». Так, в системах с дозированным впрыском топлива можно заме-

нить топливные форсунки газовыми клапанами и настроить электронную систему управления так, чтобы подавать водород в цилиндр на такте впуска после закрытия выпускного клапана. Это исключает попадание водорода в выпускной коллектор и контакт его с горячими выпускными газами. Кроме того, отсутствие во впускном коллекторе водородовоздушной смеси существенно уменьшает вероятность взрыва в коллекторе. Тем не менее, контакт смеси в цилиндре с горячими деталями – выпускным клапаном и изолятором свечи зажигания – неизбежен. В какой-то мере проблему можно решить, внедрив мероприятия по улучшению охлаждения.

Однако в целом снижение мощности по сравнению с бензиновыми версиями неизбежно. В определенных случаях с этим можно мириться, учитывая, что снижение мощности компенсируется кардинальным снижением токсичности отработавших газов. Кроме того, двигатель, работающий на обедненной водородовоздушной смеси, выбрасывает в атмосферу и меньшее количество оксидов азота благодаря снижению температуры в зоне горения. Снижение мощности может быть компенсировано за счет наддува. Для этого потребуется существенная переработка конструкции базового двигателя, главным образом по усилению деталей, воспринимающих механические нагрузки.

Наиболее радикальным решением является использование схем с внутренним смесеобразованием и искровым зажиганием. Во-первых, теплотворную способность горючего газа (благодаря подаче топлива непосредственно в цилиндр) следует относить не к суммарному объему водорода и горючего газа в коллекторе, а непосредственно к количеству подаваемого в цилиндр воздуха. Соответственно, удельная

Рис. 1. Зависимость максимально допустимой мощности двигателя ВАЗ-2111, работающего на различных составах бензоводородовоздушной смеси (дроссельная заслонка полностью открыта)



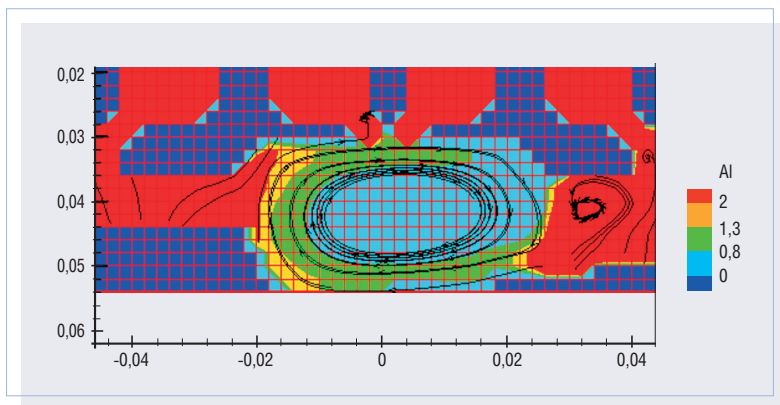


Рис. 2.
Поле концентраций водородо-воздушной смеси за 10 градусов ПКВ до ВМТ

теплотворная способность смеси повышается до 3800 кДж/м³. Это позволяет получать такую же мощность, как у бензинового двигателя, при одинаковых коэффициентах избытка воздуха.

Во-вторых, реализуемый в таких схемах принцип послойного смесеобразования в сочетании с широким диапазоном воспламеняемости водорода допускает значительное обеднение смеси на частичных нагрузках. Это способствует повышению эффективного КПД и уменьшению выбросов оксидов азота. Вероятность «хлопков» в данном случае исключена, поскольку во впускном коллекторе нет водорода. Преждевременное воспламенение смеси от нагретых деталей также маловероятно, так как впрыск водорода осуществляется только в конце сжатия.

Кроме того, согласование движения воздушного заряда с направлением и фазами подачи газа может быть организовано так, чтобы в контакт с наиболее горячими деталями входила более бедная смесь. Наконец, специальное исследование [4] показало, что при движении смеси относительно нагретой детали требуемая для воспламенения температура повышается.

Сведения, имеющиеся в литературе о двигателях с внутренним смесеобразованием и искровым зажиганием, относятся в основном к бензиновым версиям. Чтобы оценить перспективу применения таких схем в газовых и, в частности, водородных двигателях, в СПб ГПУ было проведено исследование на основе специально разработанной математической модели. В ней учитываются вязкость и нестационарность движения воздуха и газа, а также изменения объема камеры сгорания при движении поршня.

Результатом расчета являются поля скоростей, давлений, температур и концентраций компонентов топливовоздушной смеси в зависимости от угла поворота коленчатого вала. Пример поля концентраций (рис. 2) показывает, что за счет подбора конфигурации камеры сгорания и параметров подачи водорода к моменту подачи искры может быть получена хорошо воспламе-

няемая смесь в зоне свечи и более бедная — в остальном объеме камеры сгорания. Тем самым достигается надежное воспламенение, быстрое и полное сгорание и минимальная токсичность отработавших газов.

Моделирование позволяет также выбрать рациональный алгоритм управления мощностью двигателя. Он предусматривает регулирование в диапазоне от номинальной мощности до средних нагрузок и частичное дросселирование (количественное регулирование) на режимах, близких к холостому ходу, во избежание переобеднения.

Таким образом, современный уровень развития двигателестроения позволяет создавать надежные, достаточно мощные, экономичные и малотоксичные двигатели, работающие на водороде. В качестве промежуточного этапа с целью накопления опыта могут рассматриваться варианты со смешанным водородно-бензиновым питанием, а также чисто водородные двигатели с пониженной мощностью.

Необходимо еще раз подчеркнуть, что радикальное решение проблемы топлива для транспортных двигателей на основе применения водорода возможно лишь в комплексе с общей проблемой энергоснабжения промышленности и транспорта. Сегодня за счет нефтепродуктов производится около половины всей энергии, вырабатываемой в мире, — львиная доля при этом приходится на транспорт. Чтобы обеспечить его водородным топливом, потребуется не менее чем вдвое увеличить производство электроэнергии. По всей вероятности, это будет возможно лишь за счет широких программ строительства и эксплуатации АЭС. ■

Использованная литература

1. Seleznev K. P. & al. *Development and Investigation of the Hydrogen Fueling Systems used for Automobile Engines* / *Proc. of the 7-th World Hydrogen conf. Moscow: Pergamon Press, 1988, v.3 - P.2105-2118.*
2. Магидович Л. Е., Румянцев В. В. *Условия сгорания водородовоздушной смеси в двигателях внутреннего сгорания* / *Двигателестроение. 1983, №5.*
3. Гальшиев Ю. В., Магидович Л. Е., Румянцев В. В., Серебренников В. В. *Основные принципы выбора и расчета системы водородного питания транспортного двигателя* / *Рабочие процессы компрессоров и установок с ДВС. Труды ЛПИ №419* // Л.: изд. ЛПИ, 1985. С.43-45.
4. Enomoto R., Furuhami S., Nishiguchi T. *Ignitability of Hydrogen-Air Mixture by Hot Surfaces and Hot Gases in Hydrogen-Fueled Engine* / *JSAE Rev. №5, 1981, P. 23-29.*