

УДК 621.73.539.375.601.8

С.В. Новоселов

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВОДОРОДА В КАЧЕСТВЕ ТОПЛИВА ДЛЯ ПОРШНЕВЫХ ДВС

Интерес ученых области двигателестроения к водороду как топливу для ДВС прослеживается всей историей научно-технического прогресса в части создания и развития автономных силовых установок. В процессе техноЭволюции можно выделить этапы научно-технического развития этой тематики, которые характеризуют инновационный цикл развития от самой идеи использования водорода применительно в качестве топлива для ДВС. 1860-70-е годы – в литературе имеются ссылки на описания использования водорода для поршневых ДВС и двигателей «Стирлинга». 1920-е – в лаборатории Рикардо (Германия) разработана и испытана система подачи водорода на впуск для бензиновых ДВС, предназначенного для использования на дирижаблях. Из купола дирижабля наполненного водородом часть газа подавалась на ДВС, что увеличивало дальность полета. При этом важно учитывать, что к этому времени была разработана теория ДВС, которые позволяли выполнить расчет рабочего процесса с добавкой водорода к традиционному топливу. Был накоплен комплекс знаний по системам, опыт проведения испытаний и эксплуатации ДВС. Энергетический кризис 1970-х вновь обострил научный интерес к водороду для ДВС, который нарастал обширностью исследований и характеризовался снижением активности в конце 1980-х.

Исследования третьего этапа позволили систематизировать способы использования водорода для ДВС и описать динамичное повышение доли водорода к дизельному топливу, бензину, газотопливу.

При оправданной практической значимости водородного

двигателя в варианте одного топлива – водорода, процесс научно-исследовательских работ характеризуется постепенно повышающейся доли водорода в смеси. В этом процессе третьего этапа можно выделить характерные результаты:

- подача водорода в дизельное топливо в количестве до 0,1 % по массе, что определено пределами растворимости водорода;

- подача водорода на впуск в количестве до 10 % (макс до 15%) без снижения мощности для дизелей и бензиновых ДВС;

- подача, впрыск водорода непосредственно в цилиндр дизеля (внутреннее смесеобразование) в количестве 40-60 %, т.е. замещение дизельного топлива водородом. С целью повышения доли водорода в смеси рассматривалась разделенная камера сгорания, что позволяло снизить  $dP/d\phi$  (жесткость рабочего процесса) и обеспечить воспламенение смеси от запальной порции дизельного топлива (10%);

- немного работ было посвящено работе ДВС на жестком водороде, они характеризуются нарушениями нормальной работы ДВС, в частности наличием «стуков», обратных вспышек на впуск, жесткостью процесса сгорания, эмиссия окислов азота.

Практически по всем НИР отмечается проблема получения и аккумулирования водорода, решение которой еще надо найти. Практически каждый из обобщенных результатов включает исследования, связанные с разработкой системы топливоподачи водорода, разработкой водородной форсунки, камеры сгорания, изменениями в системе впуска ДВС, изучением воспламенения водородо - воздуш-

ной смеси. Эти трудности определяют исследования, требующие создания новых или использования не характерных ранее для ДВС материалов, масел, дополнительных систем.

Пригодность топлива для ДВС определяется его энерго-экологическими показателями, моторными свойствами. Водород обладает рядом особенностей, которые отличают его от других традиционных и альтернативных видов топлива для ДВС. Водород является одним из самых энергоемких топлив, и составляет  $120 \cdot 10^3$  кДж/кг, что в 2,87 раза выше дизельного топлива, однако для сжигания водорода необходимо в 2,3 раза больше воздуха. С учетом низкой плотности водорода ( $0,089$  кг/м<sup>3</sup>) теплотворность водородо-воздушной смеси стехиометрического состава ниже, чем топливовоздушных смесей традиционных топлив, что влечет снижение мощности. При внутреннем процессе смесеобразования энергоемкость выше на 12 % и более. Величина мощности водородного двигателя зависит от возможности использования области стехиометрического состава смесей в связи со склонностью к самовоспламенению на впуске, склонностью к детонации и высокой эмиссией оксидов азота. Моторные свойства водорода обеспечивают возможность формирования гомогенной смеси, исключают образование жидкой пленки во впусковом тракте. При внутреннем процессе смесеобразования формирование гомогенной смеси более сложное.

По массовой энергоемкости водород превосходит традиционные углеводородные топлива в 2,5-3, спирты в 5-6, аммиак – в 7 раз. Он обладает более высокой диффузионной способно-

стью, большей скоростью сгорания широкими пределами воспламенения. Энергия воспламенения водорода на порядок меньше чем у углеводородных топлив. Водородо-воздушная смесь устойчиво воспламеняется в широком диапазоне концентраций, от  $\alpha=0,2$  до  $\alpha=10$ . Это обеспечивает возможность работы в широком диапазоне скоростных режимов при регулировании мощности качественным и количественным способами. Самовоспламенение водородо - воздушной смеси в цилиндре двигателя, при степени сжатия соответствующей дизелям, не происходит. Для самовоспламенения этой смеси необходимо обеспечить температуру конца сжатия не менее 1023 К. Возможно воспламенение водородо - воздушной смеси от запальной порции углеводородного топлива, за счет увеличения температуры конца сжатия применением наддува или подогревом на впуске воздушного заряда.

Исследования, направленные на использование водорода в качестве топлива для ДВС, строятся так, что осуществляется постепенное замещение традиционных топлив водородом. В этой последовательности можно выделить три основных этапа: применение водорода к традиционному топливу в виде присадок; частичное замещение традиционных топлив водородом и применение водорода в чистом виде, что наиболее интересно.

Проблема использования водорода в качестве топлива для ДВС включает обширный круг вопросов: возможность перевода на водород двигателей с внутренним процессом смесеобразования и внешним с искровым зажиганием; особенности организации рабочего процесса, параметров рабочего процесса двигателей при работе на водороде; оптимальные способы регулирования рабочего процесса; разработка систем топливоподачи и ряд других.

О решении этих проблем свидетельствует обширный перечень научных работ отечественных и зарубежных авторов, где водород применяется в качестве добавки (присадки), частичного замещения традиционных и альтернативных топлив на базе двигателей с искровым зажиганием, и для двигателей с воспламенением от сжатия.

Результаты исследований параметров рабочего процесса двигателей с использованием водорода в качестве топлива для ДВС с внешним процессом смесеобразования, с искровым зажиганием показывают, что при определенных достоинствах имеются трудности организации нормальной работы двигателя. Всеми авторами отмечается наличие обратных вспышек в систему впуска, что нарушает нормальную работу двигателя. Применение внешнего процесса смесеобразования водородного двигателя приводит к уменьшению наполнения цилиндра свежим зарядом, что обуславливает снижение мощности в сравнении с базовым до 40 %. Для кардинального исключения обратных вспышек на впуск, с целью сохранения уровня мощности водородного ДВС, рекомендуется организация рабочего процесса с применением внутреннего процесса смесеобразования характерного для дизелей.

Водород в качестве топлива для дизелей характеризуется большой скоростью распространения фронта пламени, которая может превышать 200 м/с. Такая скорость может вызывать возникновение волны давления перемещающейся в камере сгорания со скоростью выше 600 м/с. Высокая скорость сгорания водородо - воздушных смесей оказывает положительное влияние на повышение эффективности рабочего процесса, одновременно предопределяются высокие значения максимального давления и температуры цикла, высокой жесткости рабочего процесса водородного двигателя.

Исследование возможности использования водорода в качестве топлива для ДВС, для дизелей, основывается на системе топливоподачи дизеля обеспечивающей растворение водорода в дизельном топливе, системе топливоподающей аппаратуры дизель- водородный двигателя, вихрекамерного дизеля. Первая обеспечивает равномерное насыщение дизельного топлива водородом в смесительной камере форсунки и впрыскивание водородом насыщенного топлива в цилиндр. Относительная масса добавляемого водорода составляет 0,1 % цикловой массы топлива. Вторая система - обеспечивает подачу водорода непосредственно в цилиндр, через специально сконструированную дополнительную клапан- форсунку с электронным приводом, с воспламенением порции топлива, подаваемого через основную топливную систему дизеля. Исследования дизель - водородного двигателя показали возможность организации рабочего процесса с 10 % и более добавкой водорода к дизельному топливу и замещение его водородом оставляя запальную порцию дизельного топлива, т.е доля водорода достигает 40-60% в смеси. Вихрекамерный дизель с полуразделенной камерой сгорания позволяет снизить жесткость процесса сгорания, однако имеет ухудшение топливной экономичности из-за несвоевременности подвода теплоты.

Исследования работы дизеля размерностью 13/14 с добавками водорода двумя способами изучались качественное и количественное изменения протекания внутрицилиндровых процессов, определяющих мощностно-экономические и экологические показатели. Так, при первой системе топливоподачи, достигнуто снижение расхода топлива на 5-8 %, выбросов сажи на 30-50 %. При подаче водорода непосредственно в цилиндр резко снижаются выбросы сажи - в 2-4 раза, а также удается снизить эмиссию оки-

слов азота за счет подачи воды на впуск. В среднем даже по первой системе концентрация сажи при работе дизеля на водородонасыщенном топливе снизилась на 10-15 %.

Уменьшение на 5-7 % температуры пламени, определенной методом оптического индцирования цилиндра дизеля, связано с уменьшением относительной доли излучения высокотемпературных частиц в общем излучении сажи вследствие общего уменьшения концентрации излучателя. Объяснение полученного характера изменения излучательных характеристик дизельного пламени заключается в присутствии избыточного водорода в топливе, участвующем в термическом крекинге, и соответственном снижении выхода низкомолекулярных углеводородов и ацетиlena, являющегося основным источником для последующего образования сажистых частиц.

Добавка водорода к дизельному топливу в количестве до 10 % привела к резкому снижению концентрации сажи и некоторому уменьшению температуры излучателя. Так, на nominalном режиме работы дизеля максимальные значения концентрации сажи снизились более чем в 2 раза, причем положительный эффект наблюдается как на стадии образования, так и выгорания сажи. Результаты расчета теплового состояния дизеля Д-461 показывают, что если радиационный тепловой поток вследствие уменьшения концентрации сажи и температуры излучателя снижается, то интенсивность конвективного теплообмена  $q_k$  при работе дизеля по второй схеме подачи водорода возрастает, что является следствием роста температур и давлений в цилиндре.

Анализ влияния присадки водорода (0,1% от цикловой массы топлива) к дизельному топливу на индикаторный КПД показывает, что вместе с интенсификацией процесса сгорания происходит увеличение полноты сгорания, уменьшается кон-

вективный и радиационный теплообмен. Конвективный - за счет снижения температуры газов, радиационный - как следствие уменьшения концентраций сажи, температуры пламени и его степени черноты. Все это способствует уменьшению составляющих неиспользования теплоты в цикле от несвоевременности и неполноты сгорания, теплообмена, изменения температуры и состава рабочего тела. В результате индикаторный КПД несколько увеличивается.

Иная картина наблюдается при добавке водорода к дизельному топливу в количестве до 10 % от цикловой массы топлива. Результатом увеличения конвективного и уменьшения радиационного тепловых потоков является соответственное изменение суммарного коэффициента неиспользования теплоты от теплообмена. Этот факт является одной из причин увеличения индикаторного КПД дизеля Д-461 при работе с присадкой водорода.

Организация рабочего процесса дизеля с частичным замещением основного топлива до 40-60 %, т.е. работа двигателя с внутренним процессом смесеобразования, при подаче водорода непосредственно в цилиндр, характеризуется более высокой жесткостью  $((dp/d\phi)_{max})$  рабочего процесса. Анализ показывает улучшение топливной экономичности при сохранении мощности двигателя, снижение ВВ с ОГ, сажи. При этом жесткость рабочего процесса и максимальное давление сгорания существенно повышаются. Так, при 50 % замещении дизельного топлива водородом на 1Ч 13/14, жесткость рабочего процесса  $((dp/d\phi)_{max})$  возрастает более чем на 100 %, а максимальное давление  $P_z$  на 30 %. Данные значения объясняются тем, что моторные свойства водорода и высокая скорость сгорания водорода определяет первую фазу тепловыделения  $x_1$ , которая увеличивается на 75 %. Она

определяется из уравнения описывающее двухфазный процесс тепловыделения

$$x = x_1 \left( 1 - e^{-\frac{k_1 - 1}{k_1} \left( \frac{\varphi_c}{\varphi_1} \right)^{k_1}} \right) + \\ + x_2 \left( 1 - e^{-\frac{k_2 - 1}{k_2} \left( \frac{\varphi_c}{\varphi_2} \right)^{k_2}} \right).$$

Моторные свойства водорода определяют его сгорание в первой фазе, что, одновременно, обеспечивая улучшение топливной экономичности и определяет рост  $(dp/d\phi)_{max}$  и  $P_z$ . Кинетический механизм определяет первую фазу сгорания, а диффузионный - вторую фазу. Коэффициент избытка воздуха при доли водорода 50 %, по нагрузочной характеристике, повышается на 12-15 %.

В зависимости от доли водорода к дизельному топливу по массе в рабочей смеси  $r = G_H/G_t$  величина  $x_1$  определяется

$$x_1 = \frac{x_{1o} + \frac{H_{UH}}{H_{UT}} r}{1 + \frac{H_{UH}}{H_{UT}} r}$$

где  $H_{un}$ ,  $H_{ut}$  – низшая теплотворная способность водорода и дизельного топлива, соответственно;  $x_{1o}$  – доля теплоты выделившейся в первой фазе при работе на дизельном топливе базового ДВС.

Применение водорода для ДВС целесообразно с целью достижения минимально уровня ВВ с ОГ. За счет снижения количества дизельного топлива подаваемого в цилиндр существенно снижаются ВВ  $CO_2$ ,  $C_xH_y$  и другие содержащие углерод. Однако высокая максимальная температура сгорания смеси определяет высокий уровень содержания в ОГ  $NO_x$ . Снижение эмиссии окислов азота возможно за счет обеднения рабочей смеси. Так, при  $\alpha > 1,8$  эмиссия  $NO_x$  практически отсутствует. При подаче воды на впуск по массе в 8 раз больше чем водорода, эмиссия  $NO_x$  снижается в 8-10 раз.

Преимущества двигателя, работающего с применением в качестве топлива водорода, в

снижении оксидов углерода и углеводородов примерно пропорционально доле замещения дизельного топлива водородом. Снижение сажи определяется водородным торможением процесса сажеобразования. Повышение максимальной температуры цикла по сравнению с базовым ДВС характеризуется увеличенным образованием  $NO_x$ , г/м<sup>3</sup>.

$$G_{NO_x} = 8,615384 \cdot 10^9 \cdot \varphi_z \times \sqrt{\frac{(\alpha_\Sigma - 1) \cdot \tau \cdot (G_T + G_{H_2})}{\eta_V \cdot i \cdot V_h \cdot n^3}} \cdot e^{-\frac{E_{обр}}{RT_z}},$$

где  $\tau$  – тактность двигателя;  $i$  – число цилиндров;  $V_h$  – рабочий объем цилиндра, л;  $n$  – частота вращения коленчатого вала, мин<sup>-1</sup>;  $T_z$  – максимальная температура цикла, К;  $\varphi_z$  – период от начала видимого сгорания до  $P_z^0$ , п.к.в.;  $\alpha_\Sigma$  – суммарный коэффициент избытка воздуха;  $G_T$  – расход дизельного топлива, кг/ч;  $G_{H_2}$  – расход водорода, кг/ч.

Количество ОГ, м<sup>3</sup>/ч, при  $T_K$  и  $P_K$  – температура и давление в начале впуска дизеля определяется:

$$Q_{OG} = 4,148 \cdot 10^{-3} \times \frac{G_{T\Sigma} \cdot T_K}{P_K} \cdot (\alpha_\Sigma + 0,0675),$$

а удельное количество выбросов (г/кВт\*ч.)  $NO_x$

$$g_{eNO_x} = \frac{Q_{OG} \cdot G_{NO_x}}{N_e}.$$

Применение водорода в качестве топлива для ДВС в первую очередь должно быть направлено на снижение уровня ВВ с ОГ. В продуктах сгорания водородного двигателя значимым ВВ компонентом являются  $NO_x$ . Снизить выбросы  $NO_x$  водородного двигателя можно одним из известных способов: частичной рекуперацией ОГ, подачей воды на впуск, снижением температуры топливовоздушной смеси на впуске, подачей воды впуск и др. Это известные способы: применения нейтрализации ОГ; путем снижения температуры заряда и

топлива; дополнительная подача воды на впуск и др. Представляет интерес комбинирование этих способов. В ОГ водородного ДВС содержаться оксид углерода и углеводороды вследствие частичного сгорания моторного масла, попадающего в камеру сгорания, однако, их количество незначительно.

Подача 5 % по массе пароводородной смеси на впуск дизеля уже позволяет улучшить параметры рабочего процесса и снизить дымность отработавших газов на 30%, а содержание окислов азота в 2...4 раза.

Решение проблемы снижения  $(dp/d\varphi)_{max}$  и одновременно  $P_z$  включает обширные исследования и поиск вариантов конструкторских решений, которые необходимы и объясняются стремлением достигнуть одновременно максимально возможной топливной экономичности и «мягкого» процесса сгорания при снижении количества ВВ с ОГ. Для дизелей с разделенной камерой сгорания, для вихревых дизелей, характерно то, что параметры рабочего процесса при использовании водорода имеют отличия. Если отмечается для таких дизелей ухудшение топливной экономичности в сравнении с дизелями при неразделенной камере сгорания, то снижается максимальное давление цикла, жесткость сгорания и уменьшается эмиссия окислов азота за счет более низкой максимальной температуре сгорания  $T_z$ , что важно для водородного ДВС.

На основании изученных особенностей водородного ДВС целесообразно рассмотреть возможность использования водорода для дизеля с разделенной камерой сгорания и при этом учитывается ряд основных рекомендаций, таких как:

- применение внутреннего процесса смесеобразования – подача водорода непосредственно в вихревую камеру дизеля на такте сжатия (или в поздней стадии впуска при использовании водорода в качестве при-

садки или при его малых величинах подачи в цилиндр);

- снижение жесткости рабочего процесса дизеля за счет использования в его конструкции разделенной, вихревой камеры сгорания, непосредственно в которую осуществляется подача водорода;

- для обеспечения стабильного и своевременного воспламенения топливовоздушной смеси в камере сгорания, при частичном замещении традиционного топлива водородом воспламенение осуществляется за счет самовоспламенения от сжатия запальной порции традиционного топлива.

Требования по расходной характеристике системы подачи водорода устанавливают расход его по нагрузочной характеристике двигателя в сравнении с базовым. Если известно значение  $r$ , которое отражает долю массы водорода по отношению к массе дизельного топлива в составе рабочей смеси газожидкостного цикла, то при известном расходе дизельного топлива базового двигателя  $G_{mo}$  количество подаваемого водорода  $G_h$  определяется выражением

$$G_h = \frac{rG_{TO}}{1 + r \frac{H_{UH}}{H_{UT}}}.$$

Из этого формируются требования к расходной характеристике системы топливоподачи водорода при заданном значении  $r$  и известных параметрах базового дизеля. Площадь расходного сечения  $F$  для системы топливоподачи водорода

$$F = \frac{G_h \sqrt{T^*}}{0,0986 \cdot q(\lambda) \cdot p_2^*},$$

где  $T^*$  – температура заторможенного потока;  $G_h$  – количество подаваемого топлива водорода, кг;  $p_2^*$  – полное давление водорода на входе в цилиндр;  $q(\lambda)$  – функция приведенной плотности потока массы, которая при докритическом истечении меньше единицы.

Связь параметров газотопливной магистрали системы топливоподачи водорода опре-

деляется через  $p_1^*$  - редуцируемое, регулируемое давление газообразного топлива

$$p_1^* = \frac{p_2^*}{\left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2\right)^{\frac{k}{k-1}}},$$

где  $\zeta$  - коэффициент газодинамических потерь потока в системе топливоподачи газообразного топлива, водорода.

Решение задачи качественного образования смеси водорода с воздухом рассматривается динамикой движения струи в цилиндре двигателя. Развитие струи водорода в цилиндре дизеля с разделенной камерой горения менее жесткое и определяется выражением

$$l = \left(\frac{\gamma}{\gamma_a}\right)^{0.25} \cdot \sqrt{\frac{W_d \cdot d \cdot t}{\operatorname{tg} \beta}},$$

где  $d$  - диаметр сечения газотоплива;  $t$  - время подачи газотоплива;  $W_d$  - действительная скорость газотоплива в расходном сечении;  $\beta$  - угол полуконуса раскрытия струи газотоплива;  $\gamma$  - плотность газотоплива на входе в цилиндр;  $\gamma_a$  - плотность среды в цилиндре ДВС.

Максимальные значения термического КПД водородного ДВС достигаются при более бедных смесях, чем у дизеля и зависят от степени сжатия и коэффициента избытка воздуха. Для водорода термический КПД на 3-4 % выше, чем при степени сжатия 8 эксплуатационного диапазона состава смеси, а. Индикаторный КПД с использованием водорода и дизельного топлива, индикаторной мощностью  $N_i$ , определяется

$$\eta_i = \frac{N_i 3600}{G_T(rH_{UH} + H_{UT})}.$$

Показатель топливной экономичности - суммарный удельный индикаторный расход топлива (кДж/кВт ч)

$$g_{i\Sigma} = \frac{G_T H_{UT} + G_H H_{UH}}{N_i} = \\ = \frac{G_T(rH_{UH} + H_{UT})}{N_i},$$

$$g_{i\Sigma} = g_{iT}(rH_{UH} + H_{UT}).$$

При использовании водорода в соотношении по теплоте 1:1 к дизельному топливу для дизеля с неразделенной камерой горения, при сохранении уровня мощности равного базовому, индикаторный расход

топлива уменьшается на 0,25 МДж/кВт·ч. Коэффициент  $\alpha$  избытка воздуха возрастает от 1,5 до 1,7.

Снижение ВВ с ОГ, улучшение топливной экономичности, определяют положительные значения энергоэкологической эффективности водородного двигателя в сравнении с традиционными ДВС. Эколого-экономическая эффективность дизель - водородного двигателя может иметь положительные значения при 40 % замещении дизельного топлива водородом, при сохранении уровня мощности базового. Для бензиновых двигателей положительное значение может быть получено при меньших значениях доли водорода в зависимости от изменений конструкции двигателя и этих затрат. Главным препятствием применения водорода для ДВС является его высокая стоимость получения и способов аккумулирования, при этом и особенности организации рабочего процесса представляют собой обширный комплекс научных инженерных задач.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Батурина С.А. Физические основы и математическое моделирование процессов результирующего сажевыделения и теплового излучения в дизелях: Дис. докт. технич. наук. - Л., 1982. - 435 с.
- Магидович Л.Е., Румянцев В.В., Шабанов А.Ю. Особенности тепловыделения и рабочего процесса дизеля, работающего с добавками водорода: Двигателестроение. -1983. -№9. -С.7-9.
- Новоселов С.В. Использование водорода в качестве моторного топлива: Теплоэнергетика. - №2. - Москва, 1996. - С.27-28.
- Новоселов А.Л., Новоселов С.В., Мельберт А.А., Унгегфук А.В. Снижение токсичности автотракторных дизелей: Уч.пос. - АлтГТУ, им. И.И. Ползунова. - Барнаул, 1996. -123 с.
- Егоров Б.В., Маркачев Ю.Е. Колебательное возбуждение при сверхзвуковом горении водородо-воздушной смеси и его влияние на кинетические и газодинамические процессы. / Химическая физика процессов горения и взрыва Т.1, Ч.1.: Черноголовка, 1996. - С.24-26.
- А.С. 1087681 СССР, МКИ F 02 B 25/06. Система питания. Двигателя внутреннего сгорания / Вагнер В.А., Матиевский Д.Д., Новоселов А.Л. и др. - № 3556791/25-06; Заявл. 29.08.83; Опубл. в Б.И., 1984, № 13.
- А.С. 1455008 СССР, МКИ F 02 B 69/04. Двигатель внутреннего сгорания / Новоселов А.Л., Новоселов С.В., Синицын В.А., Брякотин М.Э. – № 4258070/25-06; Заявл. 23.03.87; Опубл. в Б.И., 1989, № 4.

□ Автор статьи:

Новоселов

Сергей Владимирович  
- канд.техн.наук, доц. каф. «Двигатели внутреннего сгорания» Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова