

# ОСОБЕННОСТИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ДИЗЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО С ЧАСТИЧНЫМ ЗАМЕЩЕНИЕМ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА ВОДОРОДОМ

С.В. Новоселов, В.А. Сеницын

Ограниченность сырьевых запасов нефти для производства традиционных углеводородных топлив для поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) определяет актуальность работ по исследованию возможностей применения альтернативных видов топлив. Среди альтернативных топлив ярко выделяется по моторным свойствам водород. Интерес ученых к водороду как моторному топливу, экологически чистому, энергоемкому и имеющему потенциально неограниченную сырьевую базу, вполне оправдан. Обострение энергоэкологической ситуации повышает актуальность исследований в этой области.

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 для практического применения.

Проблема использования водорода в качестве топлива для ДВС включает обширный круг вопросов. Изучение возможности перевода на водород двигателей с внутренним процессом смесеобразования и внешним с искровым зажиганием; исследование особенностей организации рабочего процесса, параметров рабочего процесса двигателей при работе на водороде; определение оптимальных способов регулирования рабочего процесса; разработку систем топливоподачи и большой ряд других вопросов. В решении этих проблем известен обширный перечень научных работ отечественных и зарубежных авторов, направленных на использование водорода в качестве топлива для ДВС. В этих работах 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. В частности, 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.

На кафедре ДВС АлтГТУ им. И.И. Ползунова ведутся исследования по применению водорода для ДВС. Для исследования возможностей применения водорода в качестве топлива для дизелей разработаны оригинальные системы топливоподачи, дизель-водородный двигатель, вихрекамерный дизель (А.с. 1087681, А.с. 1455008, Патент 2096634).

Первая обеспечивает равномерное насыщение дизельного топлива водородом в смесительной камере форсунки и впрыскивание насыщенного топлива водородом в цилиндр. Относительная масса добавляемого водорода составляет 0,1% цикловой массы топлива.

Вторая система обеспечивает подачу водорода непосредственно в цилиндр двигателя, через специально сконструированную для этих целей клапан-форсунку с электронным приводом, с воспламенением рабочей смеси за счет самовоспламенения порции топлива, подаваемого через основную топливную систему. Экспериментальные исследования дизель-водородного двигателя показали работоспособность предложенной системы топливоподачи и возможность организации рабочего процесса с 10% добавкой водорода по массе к дизельному топливу.

В ходе исследований тракторного дизеля 6ЧН 13/14 (Д-461 АО «Алтайдизель») с добавками водорода двумя способами изу-

## ОСОБЕННОСТИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ДИЗЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО С ЧАСТИЧНЫМ ЗАМЕЩЕНИЕМ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА ВОДОРОДОМ

чались качественное и количественное изменения протекания внутрицилиндровых процессов, определяющих показатели мощности, топливной экономичности и экологические показатели. Так, при испытаниях дизеля, оборудованного первой системой топливоподачи, достигнуто снижение удельного расхода топлива на 5-8 %, выбросов сажи на 30-50 %. При подаче водорода непосредственно в цилиндр удалось добиться резкого снижения выбросов сажи - в 2-4 раза, расхода топлива - на 30-40 %, а также снизить эмиссию окислов азота. В среднем за рабочий цикл содержание сажи в отработавших газах при работе дизеля на водородонасыщенном топливе снизилась на 10-15%.

Уменьшение на 5-7% температуры пламени, определенной методом оптического индирования 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 ацетилена, являющегося основным источником для последующего образования сажистых частиц.

Добавка водорода к дизельному топливу в количестве до 10% от цикловой массы топлива привела к резкому снижению концентрации сажи и некоторому уменьшению температуры излучателя. Так, на номинальном режиме работы дизеля максимальные значения концентрации сажи снизились более чем в два раза, причем положительный эффект в сажевыделении наблюдается как на стадии образования, так и выгорания сажи.

Анализ результатов расчета теплового состояния дизеля Д-461 показывает, 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 РТ 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 конвективный и ра-

диационный 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 РТ. В результате индикаторный КПД несколько увеличивается.

Несколько 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 в указанных количествах.

Оценка влияния добавки водорода в различных количествах на температурное состояние поршня дизеля Д-461, выполненная с использованием МКЭ, показывает, что присадка водорода к дизельному топливу в количестве 0,1% от массы топлива вызывает снижение температуры стенок КС на 3-5 К, добавка водорода в количестве до 10% от массы топлива приводит к снижению температур стенок КС на 8-11 К.

Третий вариант исследований – организация рабочего процесса дизеля с частичным замещением основного топлива до 40-60%, т.е. по газожидкостному рабочему циклу. Работа водородного двигателя с внутренним процессом смесеобразования, неразделенной камерой сгорания, при подаче водорода непосредственно в цилиндр (форсункой), характеризуется более высокой жесткостью  $((dp/d\varphi)_{max})$  рабочего процесса. Анализ параметров рабочего процесса при оптимальных углах опережения впрыска топлива и различных составах водородовоздушных смесей показывает улучшение топливной экономичности при сохранении мощности двигателя, уменьшение концентрации сажи в отработавших газах. При этом жесткость рабочего процесса и максимальное давление сгорания существенно повышаются.

Исследования ДВС, работающих с частичным замещением дизельного топлива водородом, показывают, что при положительных экологических и других показателях значима проблема высокой жесткости рабочего процесса. В этом случае использование водорода в качестве основного топлива для

ДВС ведет к снижению моторесурса двигателя. Так, при 50% замещении дизельного топлива водородом на одноцилиндровой исследовательской установке 1Ч 13/14, жесткость рабочего процесса  $((dp/d\varphi)_{\max})$  возрастает более чем на 100%, а максимальное давление сгорания ( $P_z$ ) на 30%. Данные значения объясняются тем, что моторные свойства водорода и высокая скорость сгорания водорода определяют первую фазу тепловыделения  $x_1$ , которая увеличивается на 75%, а определяется из известного уравнения, описывающего двухфазный процесс тепловыделения.

Именно моторные свойства водорода определяют его сгорание в первой фазе, что одновременно, обеспечивая улучшение топливной экономичности, определяет рост жесткости  $(dp/d\varphi)_{\max}$  и максимального давления сгорания  $P_z$ . Кинетический механизм определяет первую фазу сгорания, а диффузионный - вторую фазу. Коэффициент избытка воздуха при 50% замещении дизельного топлива водородом, непосредственно поступающим в цилиндр, 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

$$x_1 = \frac{x_{10} + \frac{H_{UH}}{H_{UT}} r}{1 + \frac{H_{UH}}{H_{UT}} r}, \quad (1)$$

где  $H_{UH}$ ,  $H_{UT}$  - низшая теплотворная способность водорода и дизельного топлива, соответственно;  $x_{10}$  - доля теплоты выделенной в первой фазе при работе на дизельном топливе базового ДВС.

Исследования показывают, что применение водорода для двигателей внутреннего сгорания целесообразно с целью достижения минимально возможного уровня токсичности отработавших газов (ОГ). За счет снижения количества дизельного топлива подаваемого в цилиндр существенно снижаются вредные выбросы  $CO_2$ ,  $C_xH_y$  и другие содержащие углерод. Однако высокая максимальная температура сгорания смеси определяет высокий уровень содержания в ОГ окислов азота  $NO_x$ . Снижение эмиссии окислов азота возможно за счет обеднения рабочей смеси, а также за счет подачи на впуск воды, которая нормализует процесс сгорания.

Решение проблемы одновременного снижения жесткости  $((dp/d\varphi)_{\max})$  и максимального

давления сгорания ( $P_z$ ) включает обширные исследования и поиск вариантных конструкторских решений, которые необходимы и объясняются стремлением достигнуть одновременно максимально возможной топливной экономичности и «мягкого» процесса сгорания при снижении количества вредных выбросов в ОГ.

Для дизелей с разделенной камерой сгорания, для вихрекамерных дизелей характерно то, что параметры рабочего процесса имеют принципиальные отличия. Если для таких дизелей характерно 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 температуры сгорания  $T_z$ , что важно для водородного двигателя.

На основании выявленных особенностей рабочего процесса водородного двигателя целесообразно рассмотреть возможность использования водорода в качестве топлива для дизеля с разделенной камерой сгорания. При этом выполняемая работа учитывает ряд основных рекомендаций:

- применение внутреннего смесеобразования;
- подача водорода непосредственно в вихревую камеру дизеля на такте сжатия (или в поздней стадии впуска при использовании водорода в качестве присадки или при его малых величинах подачи в цилиндр);
- снижение жесткости рабочего процесса дизеля за счет использования в его конструкции вихревой камеры сгорания, 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.

В рамках работы определены требования по расходной характеристике системы подачи водорода и установлен расчетный расход топлива по нагрузочной характеристике при работе двигателя на водороде в сравнении с базовым ДВС.

Если известно значение  $r$ , которое отражает долю массы водорода по отношению к массе дизельного топлива в составе рабочей смеси газожидкостного цикла, тогда, при известном расходе дизельного топлива базового двигателя  $G_{T0}$  количество подаваемого водорода  $G_H$  определяется выражением

ОСОБЕННОСТИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ДИЗЕЛЯ,  
РАБОТАЮЩЕГО С ЧАСТИЧНЫМ ЗАМЕЩЕНИЕМ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА ВОДОРОДОМ

$$G_H = \frac{rG_{TO}}{1 + r \frac{H_{UH} \cdot V}{H_{UT}}} \quad (2)$$

Из этого выражения 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 определяется

$$F = \frac{G_H \sqrt{T^*}}{0,0986 \cdot q(\lambda) \cdot p_2^*}, \quad (3)$$

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

$$p_1^* = \frac{P_2^*}{\left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2\right)^{\frac{k\zeta}{k-1}}}, \quad (4)$$

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

Требования к развитию струи газотоплива, водорода, в цилиндре дизеля с разделенной камерой сгорания менее жесткие и определяются выражением

$$l = \left(\frac{\gamma}{\gamma_a}\right)^{0,25} \cdot \sqrt{\frac{W_\delta \cdot d \cdot t}{\text{tg}\beta}}, \quad (5)$$

где  $d$  - диаметр сечения газотоплива;  $t$  - время подачи газотоплива;  $W_\delta$  - 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 двигателя.

Индикаторный коэффициент полезного действия рабочего процесса двигателя с использованием водорода и дизельного топлива одновременно, индикаторной мощностью  $N_i$ , определяется выражением

$$\eta_i = \frac{N_i 3600}{G_T (rH_{UH} + H_{UT})}. \quad (6)$$

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

$$g_{i\Sigma} = g_{iT} (rH_{UH} + H_{UT}). \quad (7)$$

При использовании водорода в соотношении по теплоте 1:1 к дизельному топливу для дизеля с неразделенной камерой сгорания, при сохранении уровня мощности, равного базовому, индикаторный расход топлива уменьшается на 0,25 МДж/кВт·ч. Коэффициент избытка воздуха возрастает с  $\alpha=1,5$  до  $\alpha=1,7$ .

Для снижения высокого содержания окислов азота в отработавших газах водородного двигателя возможны варианты пути их снижения. Это известные способы: применение нейтрализации ОГ; снижение температуры заряда и топлива; дополнительная подача воды на впуск, а также использование криогенной системы хранения водорода, которая позволяет снизить температуру топлива. Представляет интерес комбинирование этих способов.

Авторами выполняется вариантная проработка принятой принципиальной схемы подачи топлива (водорода) в разделенную камеру сгорания двигателя. Моделируется период подачи водорода, обеспечивающий поступление необходимого количества газа и формирование соответствующего качества рабочего тела, с целью оптимизации возможных вариантов периода и продолжительности топливоподачи. Полученные результаты выполняемой работы позволят оптимизировать основные показатели системы топливоподачи и параметров рабочего процесса дизеля при использовании водорода в качестве основного моторного топлива для двигателей с внутренним процессом смесеобразования с разделенной камерой сгорания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Батурин С.А. Физические основы и математическое моделирование процессов результирующего сажевыделения и теплового излучения в дизелях: Дис. докт. техн. наук. - Л., 1982. - 435 с.
2. Матиевский Д.Д., Челяденков М.А. Снижение токсичности дизеля организацией межцилиндрового перепуска отработавших газов, охлаждаемых водой, водными растворами спиртов и аммиака: Двигателестроение. - 1986. - № 7. - С. 3-6.
3. 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.
4. Новоселов С.В. Использование водорода в качестве моторного топлива: Теплоэнергетика.- №2. - Москва, 1996. - С. 27-28.
5. Новоселов А.Л., Новоселов С.В., Мельберт А.А., Унгефук А.В. Снижение токсичности автотракторных дизелей: Уч. пос.-АлтГТУ им. И.И. Ползунова. - Барнаул, 1996. -123 с.
6. 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.
7. А.с. 1087681 СССР, МКИ F 02 В 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; Оpubл. в Б.И., 1984, № 13.
8. А.с. 1455008 СССР, МКИ F 02 В 69/04. Двигатель внутреннего сгорания / Новоселов А.Л., Новоселов С.В., Сеницын В.А., Брякотин М.Э. - № 4258070/25-06; Заявл. 23.03.87; Оpubл. в Б.И., 1989, № 4.
9. Новоселов А.Л., Новоселов С.В., Новоселов А.А. Вихрекамерный дизель. Патент № 2096634, 2.06.1995. - Б.И. №32. от 2.11.1997.