

Научный обзор
УДК 621.43:662.769.21

Обзор технологий применения водорода в двигателях с искровым зажиганием

Ван Тхач Фан¹, Андрей Юрьевич Дунин², Тху Ха Хоанг³, Дык Киен Нгуен⁴

^{1,2,3,4}Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
Москва, Россия

¹phanvanthachthuha@gmail.com

²a.u.dunin@yandex.ru

³hoangthuhavathach@gmail.com

⁴vacnike911@gmail.com

Аннотация. В статье рассматриваются перспективы использования водорода в качестве экологически чистого топлива для двигателей с искровым зажиганием (ДСИЗ). На основе анализа литературных данных проведено сравнение водородных и бензиновых ДВС. В работе выявлено преимущество водорода по выходной мощности и среднему эффективному давлению, реализуемое за счет перехода на степень сжатия 14,5:1. Это обусловлено высокой температурой самовоспламенения газа (858°C) и его исключительной теплотворной способностью, которая почти в три раза превышает показатели бензина (120 МДж/кг против 44 МДж/кг). Анализ показал более высокий эксергетический КПД водородного ДВС (69,40% против 60,49%) вследствие снижения необратимости. В работе систематизированы основные подходы к адаптации существующих ДВС под водородное топливо: частичная замена бензина или полный переход на водород, а также методы подачи топлива (непосредственный и распределенный впрыск). Особое внимание уделено анализу аномальных явлений, таких как детонация и преждевременное воспламенение, возникающих при работе на водороде, и рассмотрены преимущества использования обедненных смесей для их минимизации. Рассмотрен патент компании Toyota, предлагающий использование впрыскивания воды для минимизации эмиссии оксидов азота (NO_x) и оптимизации термодинамического КПД установки. В работе приведен подробный анализ двух конфигураций водородных двигателей, оснащенных системами рециркуляции ОГ (EGR). Кроме того, представлена принципиальная архитектура экспериментального комплекса, предназначенного для проведения стендовых испытаний.

Ключевые слова: двигатель с искровым зажиганием (ДСИЗ), водород, детонация, непосредственное впрыскивание, обедненные смеси.

Для цитирования: Фан В.Т., Дунин А.Ю., Хоанг Т.Х., Нгуен Д.К. Обзор технологий применения водорода в двигателях с искровым зажиганием // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2026. № 1 (47).

Original article

An Overview of Hydrogen Application Technologies in Spark-Ignition Engines

Van Thach Phan¹, Andrey Yu. Dunin², Thu Ha Hoang³, Duc Kien Nguyen⁴

^{1,2,3,4}Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

¹phanvanthachthuha@gmail.com

²a.u.dunin@yandex.ru

³hoangthuhavathach@gmail.com

⁴vacnike911@gmail.com

Abstract. This article explores the prospects of using hydrogen as an environmentally friendly fuel for spark-ignition (SI) engines. Based on a comprehensive literature review, a comparative analysis between hydrogen-powered and gasoline-fueled internal combustion engines (ICE) was conducted. The study identifies hydrogen's advantages in terms of power output and brake mean effective pressure (BMEP), achieved by increasing the compression ratio to 14.5:1. This is attributed to hydrogen's high auto-ignition temperature (858°C) and its exceptional heating value, which is nearly three times that of gasoline (120 MJ/kg versus 44 MJ/kg). The analysis reveals a higher exergy efficiency for the hydrogen engine (69.40% compared to 60.49%) due to reduced irreversibility. The paper systematizes primary approaches for adapting existing ICEs to hydrogen fuel, including partial gasoline substitution, full hydrogen conversion, and fuel delivery methods (direct and manifold injection). Particular emphasis is placed on analyzing combustion anomalies, such as detonation and pre-ignition, occurring during hydrogen operation, alongside the benefits of utilizing lean mixtures for their mitigation. A Toyota patent proposing water injection to minimize nitrogen oxide (NO_x) emissions and optimize thermodynamic efficiency is examined. Furthermore, the study provides a detailed analysis of two hydrogen engine configurations equipped with exhaust gas recirculation (EGR) systems. Finally, the fundamental architecture of an experimental setup designed for bench testing is presented.

Keywords: spark ignition internal combustion engine (SI engine), hydrogen, knock probability determination, direct injection, lean mixtures.

For citation: Phan V.T., Dunin A.Yu., Hoang T.H., Nguyen D.K. An Overview of Hydrogen Application Technologies in Spark-Ignition Engines. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2026. No. 1 (47).

Введение

Двигатель с искровым зажиганием (ДсИЗ) продолжает оставаться одной из основных энергетических установок [8]. Однако использование ДсИЗ на бензине приводит к выбросу вредных веществ в атмосферу, что вызывает

загрязнение окружающей среды и способствует изменению климата (парниковый эффект). В условиях сокращения запасов традиционных углеводородов из-за их высокого потребления, использование альтернатив бензину и дизелю становится ключевой задачей для ДсИЗ. Применение новых типов энергоносителей решает одновременно две задачи: расширение топливного фонда и сокращение токсичных выбросов в атмосферу.

Водород (H_2) рассматривается как один из наиболее перспективных видов топлива ввиду отсутствия углеродных выбросов (CO_2). Аналогично аммиаку, ключевое преимущество водорода заключается в экологической чистоте процесса окисления, единственным побочным продуктом которого является вода (H_2O). Кроме того, водород характеризуется исключительно высокой удельной теплотой сгорания на единицу массы.

Низшая теплота сгорания водорода почти в три раза превышает аналогичный показатель бензина. Кроме того, высокая температура самовоспламенения, большая ламинарная скорость горения и широкие концентрационные пределы воспламеняемости водорода позволяют обеспечить стабильное и быстрое сгорание сверхобедненных смесей. Это приводит к значительному расширению диапазона регулирования мощности двигателя и повышению его термической эффективности при работе на высоких степенях сжатия. Свойства водорода по сравнению со свойствами аммиака и бензина представлена в табл. 1

Таблица 1

Свойства водорода по сравнению со свойствами аммиака и бензина [2–4]

Свойства	Бензин	Аммиак	Водород
Низшая теплота сгорания H_u , МДж/кг	44,5	18,8	120
Плотность при 0,1 МПа и 298 К, кг/м ³	736	0,73	0,08
Температура самовоспламенения, К	503	930	773 ... 850
Ламинарная скорость горения, м/с	0,58	0,015	3,51
Октановое число	90 ... 98	130	> 100

Применение водорода в качестве топлива в двигателях с искровым зажиганием

Эффективность эксплуатации водородного двигателя оценивается путем сравнения его рабочих циклов с показателями стандартных двигателей внутреннего сгорания на бензине.

Показатели эффективного давления бензинового и водородного ДсИЗ представлены на рис. 1. Превосходство водородного ДсИЗ по среднему эффективному давлению (2,74 МПа против 2 МПа) объясняется его высокой выходной работой. Это связано с тем, что теплотворная способность водорода (120 МДж/кг) почти втрое выше, чем у бензина (44 МДж/кг), что увеличивает тепловыделение в цикле.

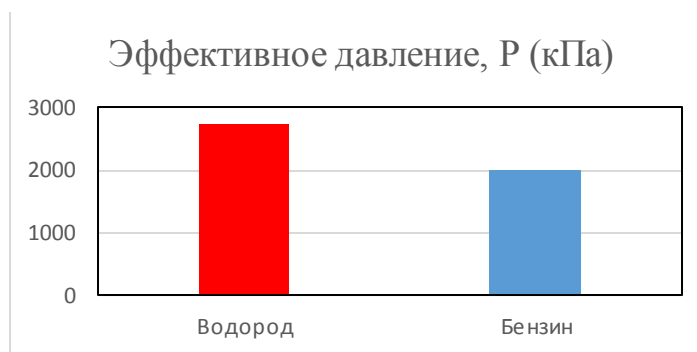


Рис. 1. Показатели эффективного давления бензинового и водородного ДсИЗ [5]

Анализ данных, представленных на рис. 2 и 3, демонстрирует энергетическое превосходство водородного ДВС: его мощность достигает 135,11 кВт, а крутящий момент – 436 Н·м, в то время как для бензинового аналога эти показатели составляют лишь 100,59 кВт и 325 Н·м соответственно.

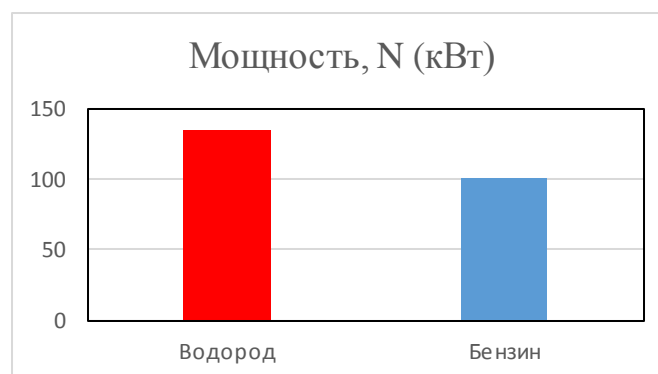


Рис. 2. Показатели мощности бензинового и водородного ДсИЗ [5]

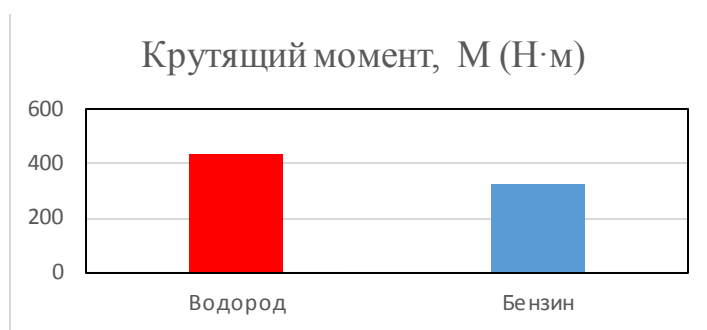


Рис. 3. Показатели крутящего момента бензинового и водородного ДсИЗ [5]

Повышение температурного градиента при сгорании H_2 приводит к увеличению тепловой эксергии, что наглядно отражено на рис. 4. Однако обратной стороной процесса выступает рост тепловой напряженности системы, способный негативно влиять на полезную мощность агрегата.

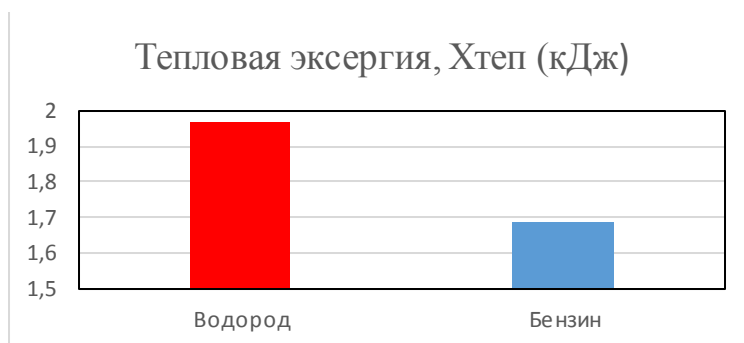


Рис. 4. Показатели тепловой эксергии бензинового и водородного ДсИЗ

В завершение следует подчеркнуть, что результаты проведенного комплексного анализа подтверждают значительное превосходство водородного ДВС над традиционным бензиновым аналогом по ряду ключевых эксплуатационных параметров. В частности, использование водорода в качестве топлива позволяет достичь более высоких показателей среднего эффективного давления, выходной мощности и крутящего момента. Кроме того, наблюдается существенный рост тепловой эксергии, что является прямым следствием специфики термодинамических процессов: повышенного уровня давления и температурного градиента, возникающих в камере сгорания при окислении водорода. Таким образом, энергетический потенциал водородного топлива обеспечивает более эффективные рабочие циклы по сравнению с классическими углеводородными горючими материалами.

Использовать водород можно либо в виде незначительной добавки к бензину и дизелю, либо путем полного перевода двигателя на работу исключительно на этом виде топлива.

Применение водорода как основного топлива обеспечивает нулевой уровень выбросов CO_2 (на выходе – только водяной пар), однако сопровождается потерей удельной мощности (до 15 ... 20 %) из-за вытеснения воздуха. Кроме того, высокие температуры сгорания способствуют интенсивному образованию NO_x , что требует использования дорогостоящих систем нейтрализации.

Использование водорода как добавки повышает эффективность сгорания и снижает расход топлива при сохранении существующей инфраструктуры. Однако этот метод лишь частично уменьшает углеродный след и сохраняет риски аномального горения (детонация, обратный прокок) из-за высокой реакционной способности смеси.

Схемы организации процесса смесеобразования при работе двигателя исключительно на водороде показаны на рис. 5. К ним относятся предварительное смешивание (внешнее) и непосредственный впрыск водорода в цилиндр (внутреннее).



Рис. 5. Способ подачи водорода и смесеобразования

Внешнее смесеобразование обеспечивает высокую гомогенность смеси при минимальных изменениях в конструкции двигателя. Однако исследования показывают, что работа на стехиометрических смесях недопустима из-за риска детонации, что требует перехода исключительно на режим обедненных смесей (рис. 6).

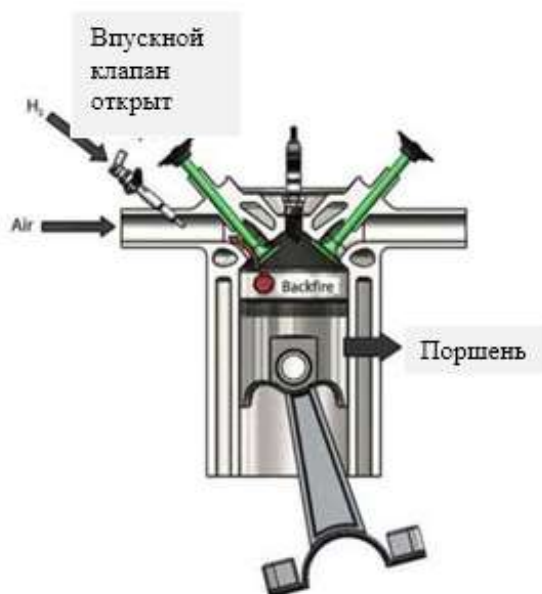


Рис. 6. Непосредственное впрыскивание водорода во впускной трубопровод

Прямое впрыскивание обеспечивает максимальную точность дозирования газа, исключая потери топлива при продувке и нивелируя негативное влияние волновых процессов во впуске [6]. Это позволяет избежать проскока смеси в выпускной тракт в фазе перекрытия клапанов (рис. 7).

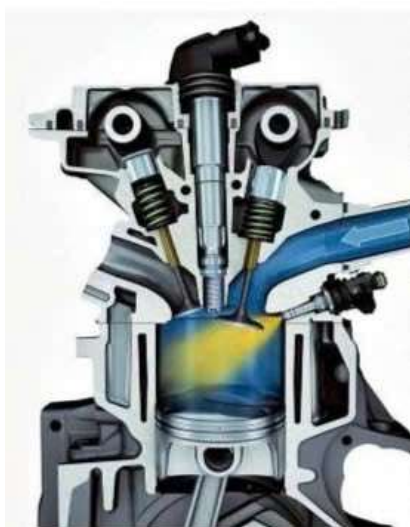


Рис. 7. Непосредственное впрыскивание водорода в цилиндр двигателя

Представленная на рис. 8 система обеспечивает точную подачу и многоступенчатый контроль сжатого водорода. Из бака высокого давления (1) газ поступает на первичный регулятор (2), а затем через игольчатый клапан (5) направляется к измерительному узлу, состоящему из ротаметра (6) и массового расходомера (7). Для стабилизации потока перед инжектором (14) используются буферный резервуар (8) и линейный регулятор (9). Безопасность системы обеспечивается обратным клапаном (11) и пламегасителем (12), предотвращающими обратный ток и распространение пламени. В случае нештатного повышения давления предохранительный клапан (3) осуществляет сброс газа через разгрузочную магистраль (15), гарантируя целостность всей инфраструктуры.

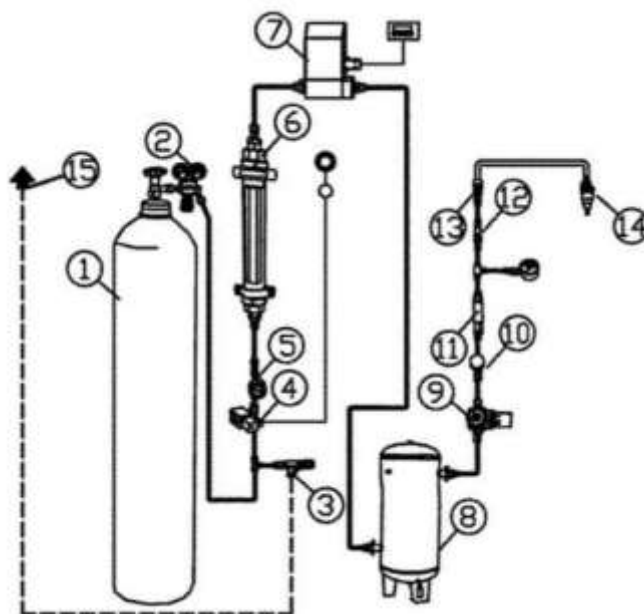


Рис. 8. Система подачи водорода

Для применения водорода в ДсИЗ необходимо глубокое понимание аномальных явлений, оказывающих негативное воздействие на силовой агрегат. К основным из них относятся детонация, обратный проскок пламени (обратный выброс).

Водород характеризуется очень высокой скоростью распространения фронта пламени. Вследствие этого процесс сгорания протекает стремительно, что может приводить к резкому нарастанию давления и температуры в

цилиндре. При отсутствии надлежащего управления процессом это потенциально способно вызвать интенсивную детонацию или привести к повреждению элементов цилиндро-поршневой группы и головки блока цилиндров.

Высокая скорость горения и низкая энергия зажигания водорода в системах PFI способствуют быстрому прорыву пламени во впускной коллектор. Возникающее взрывное горение горючей смеси создает ударную волну, которая нарушает рабочий цикл, снижает наполнение цилиндров и ведет к потере эффективной мощности двигателя.

Для эффективного подавления вышеупомянутых аномальных явлений, таких как детонация и преждевременное воспламенение смеси, эксплуатацию водородных силовых установок крайне рекомендуется осуществлять при избытке воздуха ($\alpha > 1,5$). Переход на работу с обедненными топливовоздушными смесями позволяет значительно снизить пиковые температуры в камере сгорания, что не только стабилизирует процесс окисления водорода, но и минимизирует риск возникновения обратных вспышек, обеспечивая тем самым надежность и высокий термический КПД двигателя.

Как показывают графические зависимости (рис. 9, рис. 10), для водородного агрегата при $\alpha = 1,266$ характерны более высокие значения P_z и T_z по сравнению с традиционным бензиновым двигателем. Данное сопоставление проводилось при условии постоянства оборотов коленчатого вала и угла опережения зажигания.

Графические зависимости, представленные на рис. 11, отражают динамику пиковых температур (T_z) водородного ДВС в корреляции с коэффициентом избытка воздуха. Данные показатели были получены в ходе анализа опытных индикаторных диаграмм при фиксированном скоростном режиме работы двигателя ($n = 2000 \text{ мин}^{-1}$).

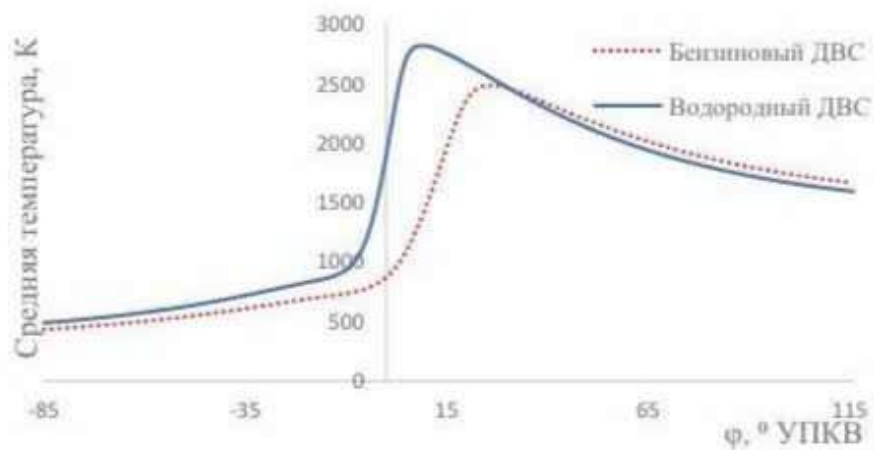


Рис. 9. Средняя температура в цилиндре моделирования бензинового ДВС ($\alpha_v = 1,049$) и водородного ДВС ($\alpha_v = 1,266$) при $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$ [6]

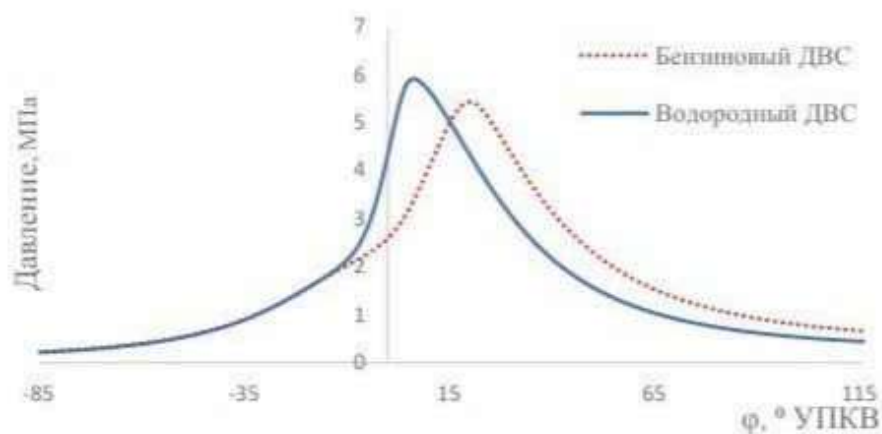


Рис. 10. Индикаторная диаграмма моделирования бензинового ДВС ($\alpha_v = 1,049$) и водородного ДВС ($\alpha_v = 1,266$) при $n = 2500 \text{ мин}^{-1}$ [6]

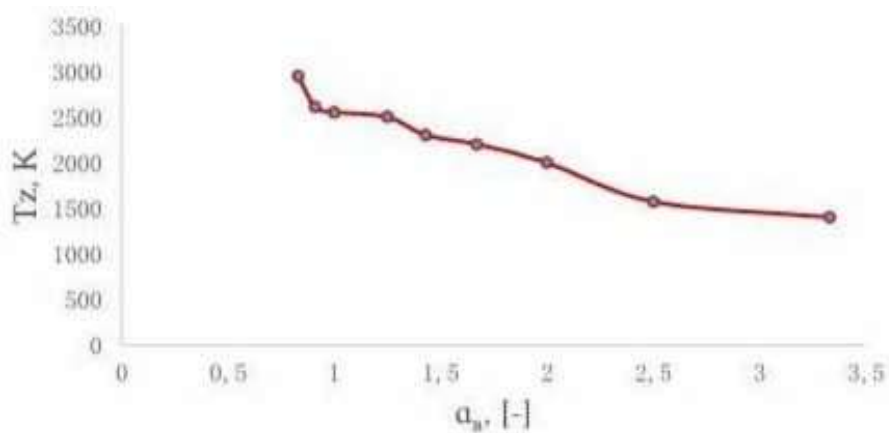


Рис. 11. Изменение максимальной температуры T_z рабочего цикла водородного двигателя в зависимости от коэффициента избытка воздуха при $n = 2000 \text{ мин}^{-1} = \text{const}$ [6]

В рамках стратегии углеродной нейтральности компания Toyota Motor Corporation занимает лидирующие позиции в разработке водородных ДВС (H₂ICE). Инновационным решением, закрепленным в патентной заявке 2023 года, стала система охлаждения путем впрыскивания воды для управления экстремально высокими температурами сгорания. Данная технология позволяет эффективно отводить избыточное тепло, минимизировать риски аномального горения и повышать производительность двигателя, что открывает путь к созданию высокоэффективных водородных транспортных средств, конкурентоспособных по сравнению с бензиновыми аналогами.

Ключевой проблемой ДсИЗ при работе на водороде является снижение объемного КПД из-за вытеснения воздуха водородом, для решения которой применяются четыре основных подхода. Первый – использование наддува (Boosting) для увеличения массы заряда, что повышает мощность, но требует контроля противодавления. Второй – непосредственный впрыск (DI), который не только увеличивает удельный объемный КПД, но и исключает риск обратного проскока пламени. Третий подход заключается в комбинации DI и наддува, обеспечивающей максимальную синергию и превосходство по мощности над бензиновыми аналогами. Четвертый подход-использование высокой степени сжатия в водородных ДВС способствует росту энергоэффективности, но одновременно провоцирует избыточное образование NO_x. Данный компромисс обусловлен тем, что улучшение термодинамических параметров происходит на фоне значительного температурного скачка в процессе сгорания.

Нейтрализация повышенного уровня оксидов азота в водородных ДсИЗ достигается путем внедрения комплекса технических решений. К внутрицилиндровым методам относятся рециркуляция ОГ (EGR), снижающая тепловую напряженность за счет инертного разбавления топливной смеси, и прямой впрыск воды (или пара), обеспечивающий эффективный отвод

избыточного тепла. В качестве финишной очистки применяется технология SCR, которая посредством каталитического воздействия и впрыска реагента преобразует NOx в экологически безопасные азот и водяной пар.

Представленная технологическая схема (12) наглядно иллюстрирует устройство и принцип работы специализированного испытательного стенда, предназначенного для исследования характеристик водородного ДВС. Система питания организована таким образом, что сжатый водород, хранящийся в баллоне под давлением 20 МПа, проходит через прецизионный расходомер и после редуцирования до уровня 0,7 МПа направляется во впускной тракт. Непосредственная подача топлива осуществляется через электромагнитную форсунку по методу распределенного впрыска (PFI).

Параллельно с этим, контур подачи окислителя включает в себя воздушный фильтр, высокоточный датчик массового расхода воздуха (MFM) и дроссельный узел, регулирующий наполнение цилиндров. Ключевой инновационной составляющей данного стенда является реализация системы форкамерного зажигания (Pre-Chamber Ignition). В отличие от традиционной искровой схемы, в данном случае воспламенение инициируется в малом объеме форкамеры (PC). Формирующиеся при этом турбулентные плазменные факелы проникают в основную камеру сгорания (MC), обеспечивая многоточечный и форсированный подвод энергии. Такая организация процесса сгорания не только существенно интенсифицирует окисление водородно-воздушной смеси, но и позволяет достичь значительного прироста эффективного КПД при одновременной минимизации термической эмиссии оксидов азота (NOx).

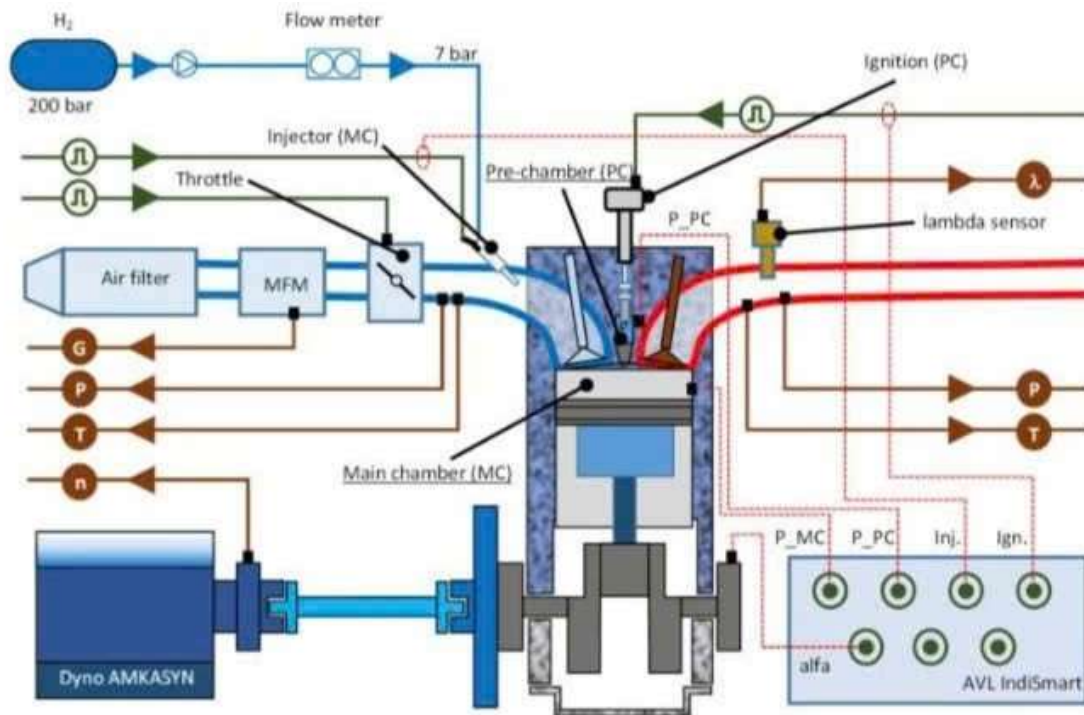


Рис. 12. Схема принципа работы испытательного стенда двигателя [9]

Система водородного двигателя с интегрированной EGR представлена на рис. 13

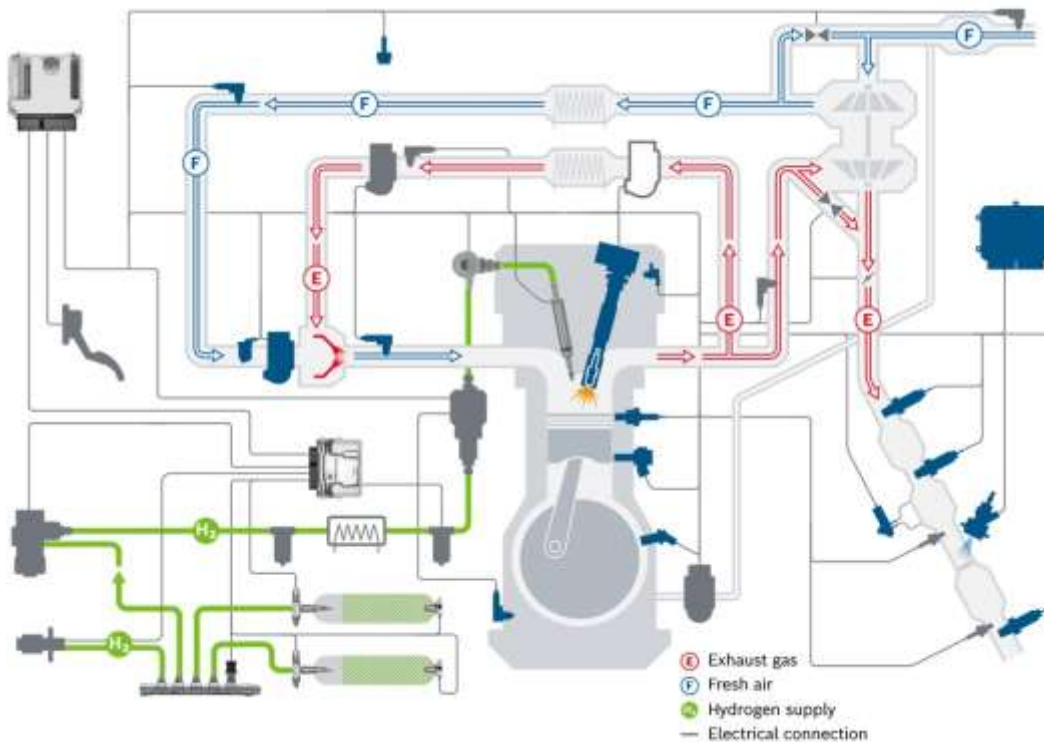


Рис. 13. Система водородного двигателя с интегрированной EGR [10]

На схеме изображена система питания водородного двигателя, где ЭБУ координирует работу EGR для минимизации экологической нагрузки. Технологический цикл включает подачу очищенного воздуха (охлажденного для увеличения массового заряда) и распределенный впрыск водорода. Особенностью схемы является подмешивание отработавших газов, которые предварительно охлаждаются и дозируются клапаном (E). Внедрение EGR в состав горючей смеси позволяет эффективно контролировать пиковые температуры сгорания, что ведет к существенному сокращению выбросов (NOx) без потери эффективности двигателя.

Выводы

Использование водорода в качестве моторного топлива открывает широкие возможности для модернизации двигателей с искровым зажиганием (ДсИЗ):

- переход на водородную энергию способствует значительному повышению экологической безопасности и эксплуатационного КПД силовых агрегатов, минимизируя углеродный след до нулевого уровня;
- Благодаря специфике сгорания водорода (высокие значения давления и температуры), такие двигатели демонстрируют более высокие мощностные характеристики и показатели эксергии по сравнению с традиционными бензиновыми ДВС. Однако термический рост (T_z) в камере сгорания провоцирует интенсивное образование оксидов азота (NOx), что требует внедрения дополнительных мер по очистке отработавших газов.

Список источников

1. Альтернативные топлива для двигателей внутреннего сгорания / А. А. Александров, И. А. Архаров, В. В. Багров [и др.] ; Под редакцией А. А. Александрова, В. А. Маркова. – Москва : ООО НИЦ «Инженер», ООО «Онико-М», 2012. – 790 с. – ISBN 978-5-7013-0140-3. – EDN VCHZNB.
2. Ammonia/hydrogen mixtures in an SI-engine: Engine performance and analysis of a proposed fuel system / C. S. Mørch, A. Bjerre, M. P. Gøttrup [et al.] // Fuel. – 2011. – Vol. 90, No. 2. – P. 854-864. – DOI 10.1016/j.fuel.2010.09.042. – EDN OBEAYB.

3. The role of hydrogen for future internal combustion engines / A. Onorati, R. Payri, Bm. Vaglieco [et al.] // *International Journal of Engine Research*. – 2022. – Vol. 23, No. 4. – P. 529-540. – DOI 10.1177/14680874221081947. – EDN JRPOGW.
4. Pourkhesalian, A. M. Alternative fuel and gasoline in an SI engine: A comparative study of performance and emissions characteristics / A. M. Pourkhesalian, A. H. Shamekhi, F. Salimi // *Fuel*. – 2010. – Vol. 89, No. 5. – P. 1056-1063. – DOI 10.1016/j.fuel.2009.11.024.
5. Fauzan, M. F. Comparative thermodynamics analysis of gasoline and hydrogen fuelled Internal Combustion Engines / M. F. Fauzan // *International Journal of Advanced Scientific Research and Management (IJASRM)*. – 2017. – Vol. 2, No. 3. – P. 87-99.
6. Локальный теплообмен в камере сгорания водородного двигателя, работающего на обедненной горючей смеси / Р. З. Кавтарадзе, А. М. Кондратьев, Ч. Жунжун [и др.] // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. – 2021. – № 1. – С. 97-107. – DOI 10.31857/S0235711921010120. – EDN TZGETX.
7. Пат. US 2023/0304452 A1 Соединенные Штаты Америки, МПК F02B 17/00, F02D 41/00. Hydrogen fueled engine with jet ignition / Suzuki Y., Tsuchiya T. ; заявитель и патентообладатель Toyota Jidosha Kabushiki Kaisha. – № 17/803212 ; заявл. 22.03.2022 ; опубл. 28.09.2023, Бюл. № 39. – 12 с. : ил.
8. Оценка показателей двигателя с искровым зажиганием при его работе на аммиаке / В. З. Нгуен, А. Ю. Дунин, Э. У. Ахметжанова [и др.] // *Автомобиль. Дорога. Инфраструктура*. – 2024. – № 4(42). – EDN XALNTH.
9. Pielecha, I. Combustion Characteristics of a Hydrogen-Fueled TJI Engine under Knocking Conditions / I. Pielecha, F. Szwajca // *Energies*. – 2024. – Vol. 17, No. 6. – P. 1324. – DOI 10.3390/en17061324. – EDN YXAKOO.
10. Bosch Mobility Solutions: Герлингген. – URL: [bosch-mobility.com/en/solutions/powertrain/gas/direct-injection-for-hydrogen-engines/](https://www.bosch-mobility.com/en/solutions/powertrain/gas/direct-injection-for-hydrogen-engines/) (дата обращения: 03.02.2026).

References

1. Aleksandrov A.A., Arkharov Y.A., Bagrov V.V., Gaivoronsky A.I., Grekhov L.V., Devyanin S.N., Ivashchenko N.A., Markov V.A. *Al'ternativnye topliva dlya dvigatelej vnutrennego sgoraniya* (Alternative fuels for internal combustion engines), Moscow, ООО NIC «InzheneR», ООО «Oniko-M», 2012, 790 p., ISBN 978-5-7013-0140-3.
2. Mørch C.S., Bjerre A., Gøttrup M.P., Sorenson S.C., Schramm J. Ammonia/hydrogen mixtures in an SI-engine: Engine performance and analysis of a proposed fuel system, *Fuel*, 2011, vol. 90, no. 2, pp. 854-864, doi 10.1016/j.fuel.2010.09.042.
3. Onorati A., Payri R., Vaglieco Bm., Agarwal Ak., Bae C., Bruneaux G., Canakci M., Gavaises M., Günthner M., Hasse C., Kokjohn S., Kong S.C., Moriyoshi Y., Novella R., Pesyridis A., Reitz R., Ryan T., Wagner R., Zhao H. The role of hydrogen for future internal

combustion engines, *International Journal of Engine Research*, 2022, vol. 23, no. 4, pp. 529-540, doi 10.1177/14680874221081947.

4. Pourkhesalian A.M., Shamekhi A.H., Salimi F. Alternative fuel and gasoline in an SI engine: A comparative study of performance and emissions characteristics, *Fuel*, 2010, vol. 89, no. 5, pp. 1056-1063, doi 10.1016/j.fuel.2009.11.024.

5. Fauzan M.F. Comparative thermodynamics analysis of gasoline and hydrogen fuelled Internal Combustion Engines, *International Journal of Advanced Scientific Research and Management (IJASRM)*, 2017, vol. 2, no. 3, pp. 87-99.

6. Kavtaradze R.Z., Kondratev A.M., Junjun Ch., Cityan Ch., Baigan S., Sahvadze G.J. *Problemi mashinostroeniya i nadejnosti mashin*, 2021, no. 1, pp. 97-107, doi 10.31857/S0235711921010120.

7. Suzuki Y., Tsuchiya T. Patent US 2023/0304452 A1, 28.09.2023.

8. Nguyen V.Z., Dunin A.Yu., Akhmetzhanova E.U., Petrov A.M., Filippova E.M. *Avtomobil. Doroga. Infrastruktura*, 2024, no. 4(42).

9. Pielecha I., Szwajca F. Combustion Characteristics of a Hydrogen-Fueled TJI Engine under Knocking Conditions, *Energies*, 2024, vol. 17, no. 6, p 1324, doi 10.3390/en17061324.

10. Bosch Mobility Solutions. Gerlingen, available at: [bosch-mobility.com/en/solutions/powertrain/gas/direct-injection-for-hydrogen-engines/](https://www.bosch-mobility.com/en/solutions/powertrain/gas/direct-injection-for-hydrogen-engines/) (03.02.2026).

Рецензент: Г.Г. Тер-Мкртчян, д-р техн. наук, доц., МАДИ

Информация об авторах

Фан Ван Тхач, аспирант, МАДИ.

Дунин Андрей Юрьевич, д-р техн. наук, доц., МАДИ.

Хоанг Тху Ха, слушатель подготовительного факультета, МАДИ.

Нгуен Дык Киен, аспирант, МАДИ.

Information about the authors

Phan Van Thach, postgraduate, MADI.

Dunin Andrey Yu., Doctor of Sciences (Technical), associate professor, MADI.

Hoang Thu Ha, Student of the Preparatory Department, MADI.

Nguyen Duc Kien, postgraduate, MADI.

Статья поступила в редакцию 04.02.2026; одобрена после рецензирования 17.02.2026; принята к публикации 24.03.2026.

The article was submitted 04.02.2026; approved after reviewing 17.02.2026; accepted for publication 23.03.2026.