

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

13.03.03 Энергетическое машиностроение

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Альтернативные источники энергии транспортных средств

(направленность (профиль) / специализация)

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)**

на тему Перспективы применения водорода в бензиновых ДВС для легкового автомобиля

Обучающийся

С.Р. Силемоншоев

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.т.н., доцент, Н.М. Смоленская

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Консультант

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2025

Аннотация

Тема выпускной квалификационной работы (ВКР): «Перспективы применения водорода в бензиновых ДВС для легкового автомобиля».

ВКР содержит пояснительную записку объемом 68 страниц, включающую в себя введение, три раздела, заключение, дополненную 6 таблицами, 24 рисунками. Список использованной в работе литературы включает в себя 17 отечественных источников и 13 зарубежных.

Ключевым вопросом выпускной работы является исследование вопроса целесообразности применения водорода в качестве топлива для легковых автомобилей.

Целью бакалаврской работы является проведение научного исследования, направленного на оценку перспективы применения водорода в бензиновых ДВС на легковом автомобиле.

Объектом исследования является автомобиль, работающий на водородном двигателе.

Предметом исследования являются перспективы развития и перехода автомобильного транспорта на альтернативный вид топлива - водород.

ВКР может быть разделена на следующие логически взаимосвязанные блоки: теоретические основы применения водорода в ДВС, сравнение водорода как топлива с другими видами топлив, анализ модификации бензинового ДВС для работы на водороде, изучение влияния водорода на рабочие процессы в ДВС, изучение проведенных экспериментальных исследований по данной тематике.

Abstract

Topic of the final qualifying work (FQW): «Prospects for the use of hydrogen in gasoline ICEs for passenger cars».

The FQW contains an explanatory note of 68 pages, including an introduction, three sections, a conclusion, supplemented by 6 tables, 24 figures. The list of literature used in the work includes 17 domestic sources and 13 foreign ones.

The key issue of the final work is to study the feasibility of using hydrogen as a fuel for passenger cars.

The purpose of the bachelor's work is to conduct a scientific study aimed at assessing the prospects for using hydrogen in gasoline ICEs in a passenger car.

The object of the study is a car running on a hydrogen engine.

The subject of the study is the prospects for the development and transition of motor transport to an alternative type of fuel - hydrogen.

The final qualifying work can be divided into the following logically interconnected blocks: theoretical foundations of the use of hydrogen in internal combustion engines, comparison of hydrogen as a fuel with other types of fuel, analysis of modification of a gasoline internal combustion engine to run on hydrogen, study of the influence of hydrogen on working processes in internal combustion engines, study of experimental studies conducted on this topic.

Содержание

Введение.....	4
1 Теоретические основы применения водорода в ДВС	7
1.1 Физико-химические свойства водорода как топлива	7
1.2 Способы подачи водорода в ДВС.....	12
1.3 Преимущества и недостатки водородных ДВС	14
1.4 Мировой опыт применения водорода в автомобилях	27
2 Анализ модификации бензинового ДВС для работы на водороде	30
2.1 Конструктивные изменения двигателя	30
2.2 Влияние водорода на рабочие параметры ДВС	31
2.3 Экологические показатели	38
2.4 Экономическая целесообразность.....	39
3 Экспериментальные исследования и перспективы внедрения	44
3.1 Методика проведения испытаний	44
3.2 Результаты экспериментов.....	49
3.3 Перспективы развития технологии	56
3.4 Рекомендации для автопроизводителей	60
Заключение	63
Список используемой литературы и используемых источников.....	64

Введение

Понимание механизмов формирования негативных экологических аспектов функционирования автомобильного транспорта является необходимым элементом для ориентирования в большом разнообразии мер совершенствования конструкции современных автомобилей, понимания целей и сути этих технологий [15].

Существующие и перспективные способы улучшения энергоэкологических характеристик автомобилей в настоящее время систематизированы и изложены в специализированной литературе, например [17]. Основное внимание уделяется принципиальным особенностям тех или иных технологий и их влиянию на выходные энерго-экологические характеристики автомобилей. При рассмотрении альтернативных автотранспортных топлив внимание уделяется как методам их производства, так и особенностям использования в автомобилях.

В настоящее время в Европе действует экологический стандарт Евро-7, вступивший в силу 14 мая 2024 года, но его применение постоянно переносится по разным причинам.

Стандарт Евро-7 это европейский стандарт, направленный на снижение выбросов загрязняющих веществ транспортными средствами. Его цель - сделать транспорт более экологичными, чтобы защитить здоровье и окружающую среду. Данный стандарт больше не ограничивается выбросами, которые учитывают лишь работу двигателей. Фактически, теперь контролируется загрязнение, выделяемое при торможении и использовании шин. Стандарт направлен на сокращение выбросов загрязняющих газов, таких как оксиды азота (NO_x), мелкие частицы и парниковые газы. Также необходимо, чтобы транспортные средства оставались эффективными на протяжении всего срока службы, а не только когда они новые.

Автомобильный транспорт оказывает существенное, но не самое главное, влияние на общую экологическую обстановку на всей планете Земля. Экологическая обстановка на планете ухудшается с каждым днем, а запасы нефти и газа ежедневно уменьшаются. Что же будет с человечеством, когда они полностью исчерпаются? И не случится ли катастрофы раньше — от парникового эффекта, таяния ледников или аварий на атомных станциях? Чтобы не задаваться этими вопросами, чтобы обеспечить достойную жизнь следующим поколениям, уже сегодня передовые государства и ответственные компании активно развивают альтернативную энергетику. Что это такое, в чем выражается, какие плюсы и минусы несет с собой и как существует сегодня [1]. Переход на возобновляемые источники энергии стал своеобразным трендом среди современных развитых государств. Так, согласно Парижскому соглашению, к 2030 целый ряд стран достигнет нулевого процента выброса углерода в атмосферу. Как раз одним из альтернативных видов топлива и является водород.

Водород считается перспективным экологичным топливом, поскольку при его сгорании выделяется только вода, что делает его полностью чистым источником энергии. Использование водорода в топливных элементах позволяет эффективно преобразовывать химическую энергию в электрическую без вредных выбросов. Водород можно получать из возобновляемых источников, таких как солнечная или ветровая энергия, что делает его ключевым элементом "зелёной" экономики. Автомобили на водородных топливных элементах уже существуют и демонстрируют высокую эффективность, а их единственным выхлопом является водяной пар. Развитие водородной энергетики может значительно снизить зависимость человечества от ископаемого топлива и сократить выбросы парниковых газов.

Актуальность исследования перспектив применения водорода в бензиновых ДВС для легковых автомобилей обусловлена необходимостью

снижения вредных выбросов и выполнения экологических норм без полного отказа от существующих двигателей. Использование водорода в качестве добавки к бензину может повысить эффективность сгорания топлива, уменьшить расход углеводородов и сократить выбросы CO_2 . Кроме того, переход на водородно-бензиновые смеси требует меньших затрат по сравнению с полной заменой ДВС на водородные топливные элементы, что делает его экономически выгодным промежуточным решением.

Целью бакалаврской работы является проведение научного исследования, направленного на оценку перспективы применения водорода в бензиновых ДВС на легковом автомобиле.

Объектом исследования является автомобиль, работающий на водородном двигателе.

Предметом исследования являются перспективы развития и перехода автомобильного транспорта на альтернативный вид топлива - водород.

Сформулированные задачи бакалаврской работы:

- проанализировать возможности использования водорода в бензиновых ДВС;
- оценить технические и экономические аспекты применения водородных двигателей на легковых автомобилях;
- исследовать влияние водородных добавок на характеристики двигателя.

В качестве информационных источников использовали открытые источники сети Интернет, справочная и нормативная документация, публикации в периодической литературе, сборниках статей и научных трудов по выбранной тематике.

ВКР состоит из введения, трех разделов, заключения, списка использованных источников из 25 отечественных и 5 зарубежных работ. Общий объем работы 68 страниц машинописного текста, в том числе таблиц - 6, рисунков - 24.

1 Теоретические основы применения водорода в ДВС

1.1 Физико-химические свойства водорода как топлива

Водород, обладая наименьшей атомной массой среди всех химических элементов, представляет собой наиболее простую и распространённую форму материи во Вселенной. Благодаря своим уникальным физико-химическим параметрам, данный элемент играет важную роль в современных технологических процессах. На протяжении длительного периода водород рассматривался учёными исключительно в контексте его потенциального использования в качестве энергоносителя нового поколения. В настоящее время сфера его применения значительно расширилась, охватывая различные отрасли промышленности. Активное внедрение водородных технологий способствует кардинальным изменениям в энергетике, транспортной логистике и производственных методиках [24].

Одной из наиболее значимых характеристик водорода является его многофункциональность. Процесс получения данного элемента может осуществляться из широкого спектра исходных материалов. В частности, к числу таких источников относятся экологически чистые технологии, включая солнечную и ветровую энергетику. Параллельно с этим, водород может синтезироваться из углеводородного сырья, например, посредством метода парового риформинга метана. Подобная вариативность источников позволяет эффективно реализовывать стратегии декарбонизации мировой экономики. Одновременно с этим обеспечивается возможность адаптации водородных технологий под конкретные промышленные требования.

Не менее важным аспектом является исключительно высокая энергетическая плотность водорода. При сравнительном анализе на единицу массы водород демонстрирует более высокие энергетические показатели, чем

традиционные виды топлива, такие как бензин. Данное свойство делает его очень перспективным для использования в различных видах транспорта, включая автомобильный, морской и авиационный сектора. В процессе сгорания водорода образуется лишь водяной пар, не содержащий токсичных примесей. Таким образом, его применение полностью исключает выбросы парниковых газов в атмосферу. Дополнительным преимуществом водорода выступают его специфические химические свойства. Благодаря этим свойствам сфера его промышленного применения продолжает неуклонно расширяться.

Однако практическое использование водорода сопровождается определёнными технологическими трудностями. В частности, крайне низкая плотность данного элемента при стандартных условиях создаёт существенные сложности в вопросах его хранения и транспортировки. Кроме того, формирование необходимой инфраструктуры для крупномасштабного производства водорода требует колоссальных финансовых вложений. Несмотря на существующие ограничения, потенциальные преимущества водородных технологий остаются бесспорными. В связи с этим многие страны и крупные корпорации активно инвестируют средства в научно-исследовательские проекты. Результатом этих инвестиций становится постоянное совершенствование технологий производства, хранения и практического применения водорода [30].

Транспортные средства, оснащённые водородными топливными элементами, представляют собой экологически чистую альтернативу традиционным автомобилям, грузовому транспорту и авиации, работающим на ископаемом топливе. В отличие от бензиновых аналогов, они полностью исключают вредные выбросы в атмосферу, что соответствует современным экологическим стандартам. Благодаря значительным достижениям в области водородных технологий за последние десятилетия, данный энергоноситель

становится всё более перспективным для транспортного сектора и энергетических систем [27].

Одним из ключевых свойств водорода является его исключительно высокая удельная энергоёмкость, измеряемая в расчёте на единицу массы. Энергетическая ценность водорода превышает аналогичный показатель бензина приблизительно в три раза, что подтверждается экспериментальными данными. Данная характеристика позволяет эффективно использовать водород в качестве моторного топлива для двигателей внутреннего сгорания. При этом для адаптации существующих ДВС требуется лишь незначительная модернизация их конструктивных элементов. Помимо высокой энергоёмкости, водород отличается повышенной скоростью протекания реакции окисления. Кроме того, его смеси с воздухом демонстрируют устойчивое воспламенение в широком диапазоне температурных условий. Эти свойства гарантируют бесперебойный запуск силовых установок даже при экстремально низких или высоких температурах окружающей среды.

Преимущества водородных технологий:

- высокая энергетическая плотность - трёхкратное превосходство над традиционными топливами определяет потенциал для энергоёмких секторов экономики;
- экологическая безопасность - отсутствие углеродных выбросов способствует достижению целей декарбонизации;
- диверсификация производства - возможность генерации из ВИЭ и ископаемых ресурсов с CCS обеспечивает энергетическую гибкость;
- многоотраслевое применение - от транспорта до промышленного сырья.

Основные проблемы внедрения:

- технологии хранения: необходимость разработки компактных и безопасных систем;

- инфраструктурные ограничения: высокие капитальные затраты на создание заправочной сети;
- экономическая конкурентоспособность: зависимость от масштабирования и государственной поддержки [5].

Сравнение основных показателей трех различных топлив, на которых может работать ДВС, показаны в таблице 1.

Таблица 1 - Сравнение теплофизических свойств водорода, метана и бензина

Показатель	Единицы измерения	Топливо		
		бензин	метан	водород
Низшая теплотворная способность	мДж/кг	45,0	50,0	120,0
Стехиометрическая фракция воздуха	кг.возд/ кг. топл	14,7	17,2	34,3
Богатый предел воспламенения	-	0,4	0,7	0,2
Бедный предел воспламеняемости	-	1,4	2,1	10,0
Скорость ламинарного пламени	м/с	0,4...0,8	0,4	2,0
Адиабатическая температура пламени	К	2275	2225	2390
Температура самовоспламенения	К	-500	813	858
Минимальная энергия воспламенения	мДж	0,24	0,29	0,02
Плотность	г/л	730...780	0,72	0,09
Температура кипения	°С	25...215	-162	-253

Согласно анализу данных, представленных в таблице 1, водород демонстрирует уникальные термодинамические и кинетические параметры процесса сгорания. Данное свойство обеспечивает достижение исключительно высокого коэффициента полезного действия энергетической установки. При этом продукты сгорания практически не содержат токсичных компонентов, что подтверждается экспериментальными исследованиями.

Важнейшим преимуществом водорода является чрезвычайно широкий диапазон концентрационных пределов воспламенения. Высокая скорость преобразования химической энергии в тепловую способствует повышению эффективности рабочего цикла. Стабильность процесса инициирования горения сохраняется в различных эксплуатационных условиях. Полное отсутствие

углерода в молекулярной структуре исключает образование CO и CO₂ в выхлопных газах. Совокупность этих факторов обуславливает перспективность водорода как альтернативного моторного топлива для двигателей внутреннего сгорания.

Сравнительный анализ показывает, что воспламеняемость водородно-воздушных смесей сохраняется при значениях коэффициента избытка воздуха от 0,14 до 10,5. Для традиционного бензинового топлива рабочий диапазон существенно уже и ограничен значениями 0,4-1,4. Пределы воспламенения метана, составляющие 0,7-2,1, также значительно уступают водородным показателям. Благодаря указанным характеристикам обеспечивается стабильная работа силовой установки в гомогенном режиме при различных нагрузочных режимах.

Оптимизация рабочих параметров достигается за счёт минимизации потерь на дросселирование воздушного потока. Применение топливовоздушных смесей с коэффициентом избытка воздуха свыше 2,0 способствует понижению температурного режима. Снижение пиковых температур в камере сгорания ниже 1800 К предотвращает термическое образование оксидов азота, что обеспечивает экологическую безопасность.

Кинетические особенности горения водорода проявляются в аномально высокой скорости распространения фронта пламени. В стандартных атмосферных условиях ($p = 1,013$ бар, $T = 293,15$ К) данный параметр достигает 2,65-3,25 метров в секунду. Для сравнения, скорость ламинарного горения углеводородных топлив не превышает 0,37-0,45 м/с. Даже при значительном обеднении смеси сохраняется достаточная интенсивность процесса окисления, исключая потери эффективности.

Перспективным направлением повышения эффективности является использование систем непосредственного впрыска под давлением свыше 300 бар. Указанный технологический подход интенсифицирует турбулентные

потоки в камере сгорания, обеспечивая дополнительное увеличение скорости сгорания [10].

1.2 Способы подачи водорода в ДВС

Технология интеграции системы сгорания водорода.

Физико-химические характеристики водорода, включая его исключительную реакционную способность, создают особые требования к системам сгорания. Аномально высокая скорость окислительных процессов водорода требует разработки специализированных технических решений. Экстремально широкие концентрационные пределы воспламенения водородно-воздушных смесей обуславливают необходимость особых конструктивных подходов. Крайне низкая объемная плотность газообразного водорода существенно влияет на проектирование топливоподающих систем.

Технология распределенного впрыска в область впускного коллектора обеспечивает существенное улучшение качества топливовоздушной смеси. Данный подход позволяет минимизировать вероятность возникновения неконтролируемых детонационных процессов. Точное управление временными характеристиками и объемными параметрами подачи топлива значительно повышает энергетическую эффективность системы. Альтернативная система непосредственного впрыска обеспечивает формирование локально обогащенной смеси в зоне воспламенения.

Пространственная концентрация топливной смеси в непосредственной близости от свечи зажигания интенсифицирует процесс горения. Применение турбонаддувных систем с оптимизированной динамикой роторной группы улучшает переходные характеристики. Указанное техническое решение обеспечивает существенное повышение тяговых параметров в низкооборотном

диапазоне работы двигателя. Комплексная реализация перечисленных технологических подходов создает выраженный синергетический эффект.

Технологии обеспечения безопасности.

Современные системы безопасности водородных двигателей включают комплекс мер по предотвращению аномальных режимов горения. Многофакторная методика противодействия преждевременному воспламенению объединяет несколько технических решений. Оптимизированные алгоритмы определения угла опережения зажигания минимизируют вероятность неконтролируемого воспламенения. Совершенствование газодинамических характеристик цилиндра-поршневой группы играет ключевую роль в обеспечении стабильности процесса.

Применение современных композитных материалов с повышенной термостойкостью предотвращает возникновение локальных перегревов. Специально разработанная геометрия впускных и выпускных каналов эффективно противодействует возникновению обратных вспышек. Адаптивные алгоритмы управления давлением в системе впуска создают надежный барьер для распространения пламени. Интеллектуальные системы детонационного контроля на основе сетей высокочувствительных датчиков обеспечивают надежную защиту.

Технологии повышения надежности.

Критически важным аспектом надежности водородных силовых установок является управление переходными процессами. Усовершенствованные алгоритмы адаптивного управления обеспечивают точную подстройку рабочих параметров при изменении режимов. Многоуровневая концепция безопасности охватывает все этапы топливного тракта от хранения до подачи в камеру сгорания. Комплексный контроль процесса обращения водорода осуществляется на всех технологических этапах.

Специализированные композитные материалы с повышенной стойкостью к водородному охрупчиванию обеспечивают долговечность элементов. Уплотнительные узлы специальной конструкции гарантируют герметичность в условиях высоких рабочих давлений. Распределенные системы диагностики с высокой чувствительностью обеспечивают своевременное обнаружение потенциальных утечек. Постоянное совершенствование технологических решений способствует существенному увеличению межремонтного периода и снижению совокупной стоимости эксплуатации, что является определяющим фактором коммерческого успеха водородных технологий.

Самая распространенная система управления двигателем на водородном топливе показана на рисунке 1.

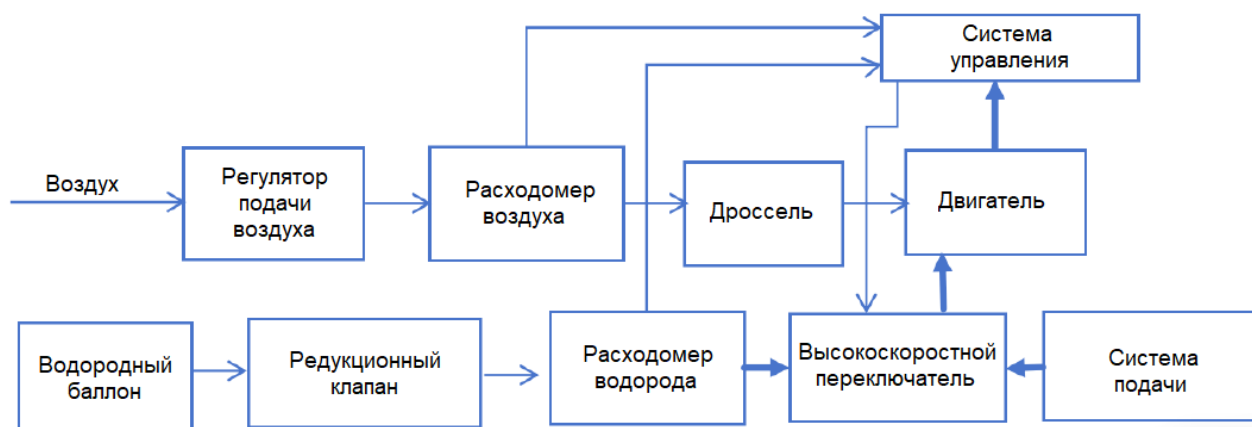


Рисунок 1 - Система управления двигателем на водородном топливе

1.3 Преимущества и недостатки водородных ДВС

Современные исследования подтверждают, что применение водорода в качестве энергоносителя обладает значительным потенциалом в различных отраслях промышленности. В частности, это включает его перспективное использование в космической отрасли, где он может заменить традиционные

виды топлива. Для повышения дальности и длительности функционирования перспективных космических аппаратов орбитального, лунного и межпланетного назначения требуется комплексная оптимизация эксплуатационных параметров водородного топлива. Ключевыми направлениями совершенствования являются минимизация потерь, возникающих вследствие испарения, что особенно актуально в условиях космического вакуума. Также важным аспектом является повышение плотности водорода, что позволит увеличить энергоемкость топливных систем. Помимо этого, необходимо обеспечить интенсификацию скорости протекания химических реакций, что напрямую влияет на эффективность двигательных установок. Одним из наиболее эффективных методов решения указанных задач является применение водорода в жидкой фазе, обладающей рядом преимуществ. Данное состояние достигается за счет криогенных технологий, обеспечивающих стабильное хранение и транспортировку.

Эффективность использования водорода в двигателях внутреннего сгорания обусловлена следующими факторами:

- расширенный диапазон воспламеняемости, превышающий аналогичные показатели классических углеводородных топлив;
- повышенный тепловой КПД, составляющий для водорода 37,5-43 %, в то время как для традиционных моторных топлив данный показатель не превышает 30 %;
- возможность применения калильного зажигания, что исключает необходимость использования дорогостоящих искровых систем;
- снижение расхода смазочных материалов и уменьшение износа двигателя, а также облегчение процесса запуска при низких температурах;
- высокая экологическая безопасность, выражающаяся в минимальном уровне вредных выбросов.

В отличие от традиционных бензиновых и дизельных ДВС, водородные двигатели внутреннего сгорания (НДС) в процессе сгорания генерируют преимущественно водяной пар, практически не производя парниковых газов и токсичных соединений. Данная характеристика, связанная с экологической чистотой выбросов, позволяет рассматривать НДС в качестве перспективного решения для борьбы с глобальным изменением климата и защиты окружающей среды. Кроме того, их внедрение способствует снижению зависимости от нефтяных ресурсов и диверсификации структуры энергетического баланса.

Благодаря высокой энергетической плотности водород содержит значительно больше энергии на единицу массы по сравнению с бензином и дизельным топливом. Вследствие этого водородные двигатели внутреннего сгорания демонстрируют повышенную мощность, одновременно обеспечивая увеличенный запас хода, что подтверждается экспериментальными данными, представленными на рисунке 2 [30].

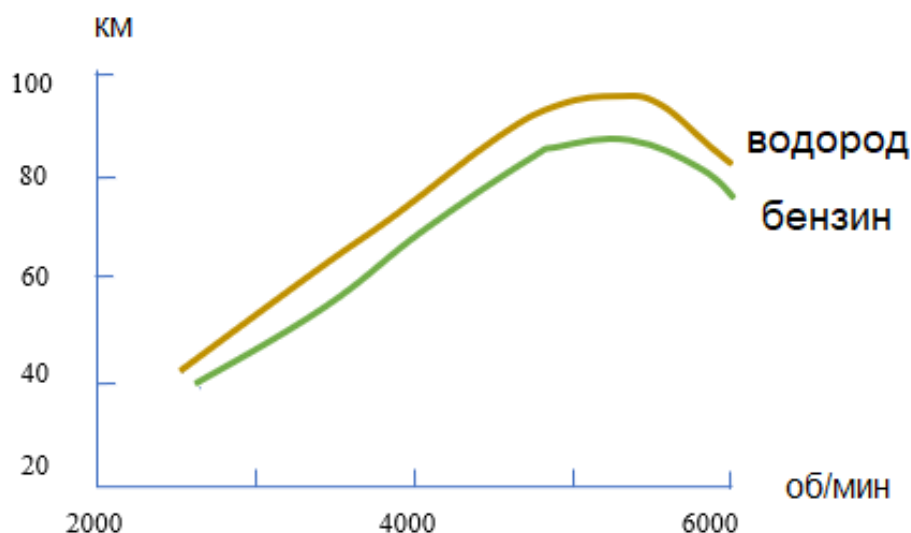


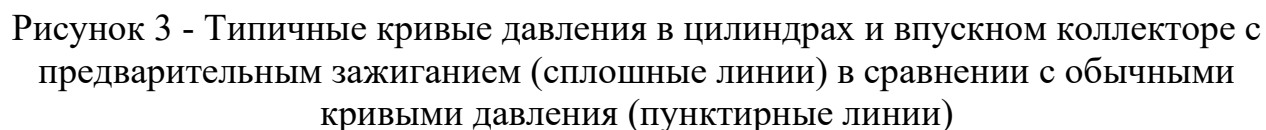
Рисунок 2 - Сравнение двигателя на сжатом природном газе и базового бензинового двигателя

Указанные характеристики приобретают особую актуальность для транспортных средств, предназначенных для эксплуатации в условиях длительных рабочих циклов. К данной категории относятся машины, регулярно преодолевающие значительные расстояния без остановок. Кроме того, рассматриваемые особенности критичны для техники, работающей под воздействием экстремальных механических нагрузок. Высокая скорость окислительных реакций, характерная для водородного топлива, обеспечивает существенное технологическое преимущество. Немаловажным фактором является также сравнительно низкая температура протекания процессов горения водорода. Совокупность этих параметров способствует более эффективному преобразованию тепловой энергии в полезную механическую работу. В результате наблюдается значительное повышение общего коэффициента полезного действия энергетической установки.

В процессе окисления водородного топлива в камерах сгорания двигателей внутреннего сгорания могут возникать различные отклонения от нормального режима работы. В рамках проводимого анализа рассматриваются три основных типа аномальных процессов горения. К ним относятся явления преждевременного воспламенения топливной смеси. Также изучаются случаи детонационного характера сгорания. Особое внимание уделяется процессам обратной вспышки с распространением пламени во впускную систему.

Типичный случай аномального воспламенения возникает во время такта сжатия рабочего цикла двигателя. Данное явление происходит при полностью закрытых впускных клапанах системы газораспределения. Его основной причиной служит паразитное зажигание смеси, известное как аномальное поверхностное воспламенение. Следует отметить, что подобные процессы могут быть вызваны множеством различных факторов. Ввиду случайного характера возникновения преждевременного зажигания, его экспериментальное исследование сопряжено со значительными методическими трудностями. В

На графике рисунка 3 демонстрируются сравнительные данные измерения давления. Кривые отражают изменение давления в цилиндре двигателя в зависимости от угла поворота коленчатого вала. Дополнительно показана динамика давления во впускном коллекторе системы питания.



18

при постоянной частоте вращения 3200 об/мин. Для штатного режима работы (пунктирная линия) было зафиксировано индикаторное давление 7 бар.

Квазисимметричный характер кривой давления является следствием аномального преждевременного воспламенения. Данное явление приводит к существенному снижению рабочих характеристик. В частности, наблюдается падение индикаторного давления практически до нулевых значений. Интересно отметить, что максимальное значение давления при аномальном цикле превышает аналогичный показатель нормального сгорания. Однако раннее начало роста давления (приблизительно за 80° до верхней мертвой точки) полностью нивелирует полезную работу. В результате среднее эффективное давление для случая преждевременного зажигания составляет около 0 бар.

Анализ характеристик впускного давления при возникновении явления предварительного зажигания не выявляет существенных отличий от параметров нормального рабочего цикла. Данный факт может быть объяснен временными характеристиками процесса возникновения аномального воспламенения. Физически процесс предварительного зажигания развивается в цилиндре только после полного закрытия впускных клапанов.

Для эффективного предотвращения случаев преждевременного воспламенения требуется реализация комплекса специальных технических решений. Первостепенное значение имеет применение свечей зажигания с оптимизированной конструкцией электродов. Существенное влияние оказывает использование систем зажигания, характеризующихся минимальным значением остаточного заряда. Обязательным требованием является внедрение специализированной системы вентиляции картерного пространства. Важным технологическим решением выступает применение выпускных клапанов с полостью, заполненной металлическим натрием. Особое внимание должно уделяться совершенствованию конструкции жидкостных охлаждающих каналов двигателя. Наиболее эффективным методом предотвращения предварительного

зажигания считается использование системы непосредственного впрыска водородного топлива.

Анализ явления обратной вспышки.

Процесс обратной вспышки представляет собой аномальное воспламенение топливовоздушной смеси, происходящее на такте впуска рабочего цикла. Характерной особенностью данного явления является распространение фронта пламени в обратном направлении - во впускной коллектор двигателя. Физический механизм возникновения обратной вспышки связан с контактом свежей горючей смеси с различными источниками преждевременного воспламенения.

К основным источникам инициации обратной вспышки относятся локальные перегревы в камере сгорания. Значительную роль играет контакт с высокотемпературными остаточными газами предыдущего цикла. Частой причиной становится наличие раскаленных частиц нагара на поверхностях. В отдельных случаях инициатором может выступать остаточный плазменный заряд в системе зажигания.

Принципиальное отличие от явления предварительного зажигания заключается в фазе рабочего процесса. Обратная вспышка развивается при полностью открытых впускных клапанах. Это приводит к ряду характерных последствий, включая резкий рост давления во впускной системе. Процесс сопровождается выраженным акустическим эффектом. В тяжелых случаях возможно разрушение элементов впускного тракта.

Вероятность возникновения обратной вспышки существенно возрастает при работе на стехиометрических смесях. Это связано с уменьшением минимальной энергии воспламенения. В современных двигателях с внутренним смесеобразованием частота возникновения обратной вспышки снижена. Достигается это за счет реализации стратегии впрыска топлива после закрытия впускных клапанов.

На рисунке 4 представлены результаты экспериментальных исследований. Данные получены на одноцилиндровой исследовательской установке автомобильного класса. Испытания проводились при постоянной частоте вращения 3200 об/мин. Индикаторное давление составляло 7 бар. На графике отображены кривые давления в цилиндре и впускном коллекторе. Зафиксирован характерный случай возникновения обратной вспышки.

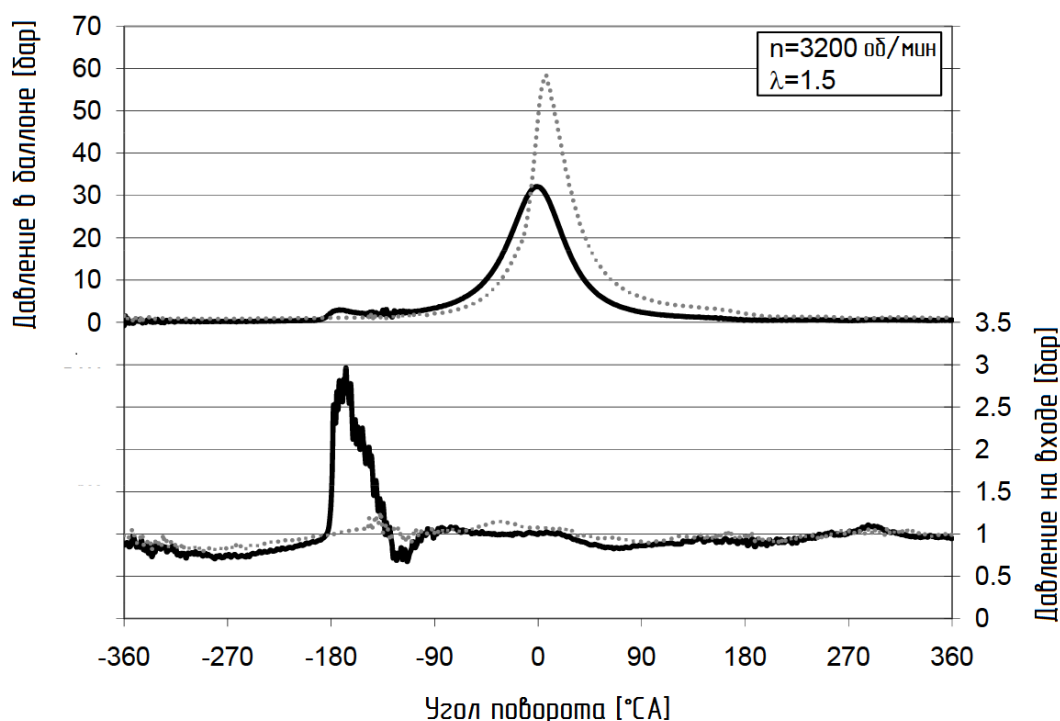


Рисунок 4 - Типичные кривые давления в цилиндре и впуске для цикла обратного горения (сплошные линии) по сравнению с обычными кривыми давления (пунктирные линии)

Современные научные исследования процессов аномального горения демонстрируют существование устойчивой корреляционной связи между различными типами нарушений рабочего процесса. Установлено, что явление предварительного зажигания выступает в роли катализирующего фактора для последующего возникновения обратной вспышки. Термическое воздействие, оказываемое процессами преждевременного воспламенения на элементы

конструкции камеры сгорания, создает благоприятные условия для развития аномальных явлений. Проведенный анализ подтверждает, что комплекс мер по предотвращению случаев предварительного зажигания одновременно способствует снижению вероятности возникновения обратного горения.

Значительный объем научно-исследовательских работ был сосредоточен на вопросах оптимизации геометрических параметров впускных систем. Особое внимание было уделено совершенствованию алгоритмов управления процессами топливоподачи в различных режимах работы. Инновационным решением стало применение методики предварительного впуска очищенного воздуха для эффективного охлаждения потенциальных очагов локального перегрева. Комплексные экспериментальные и расчетные исследования систем распределенного впрыска топлива позволили получить значимые научные результаты. Были разработаны точные прогностические модели поведения топливовоздушной смеси. Практическим итогом исследований стал комплекс рекомендаций по исключению явлений обратной вспышки.

Несмотря на существенное ограничение рабочего диапазона, обусловленное аномалиями процессов сгорания, были найдены эффективные решения. Комбинация оптимизированных стратегий топливоподачи с advanced системами изменения фаз газораспределения показала высокую эффективность. В результате удалось обеспечить стабильную работу силовых установок на стехиометрических смесях во всем диапазоне эксплуатационных режимов.

Детонационные процессы и методы их оценки.

Явление самовоспламенения конечных порций топливовоздушной смеси возникает при достижении критических термодинамических параметров. Ключевыми факторами, определяющими возникновение детонации, являются предельные значения давления и температуры. Важную роль играет временной фактор выдержки смеси в экстремальных условиях. Результатом становится мгновенное высвобождение значительного количества химической энергии.

Этот процесс сопровождается формированием ударных волн с характерной высокой амплитудой колебаний.

Для количественной оценки сопротивления топлив детонационным процессам в мировой практике применяется система октановых чисел. Определение данного параметра осуществляется на специальных установках стандартизированной конструкции. Наиболее распространенными являются двигатели CFR и исследовательские установки типа УИТ-85. Методика испытаний предполагает сравнительный анализ с эталонными топливными смесями.

Стандартизированные протоколы испытаний включают два основных метода. Исследовательский метод (RON) проводится в контролируемых лабораторных условиях. Моторный метод (MON) предполагает более жесткие условия тестирования. В случае водородных топлив зафиксирован значительный разброс декларируемых значений октановых чисел. Этот факт вызывает обоснованные вопросы относительно применяемых методик определения. Альтернативные подходы используют анализ высокочастотных составляющих сигнала давления.

Методология определения октановых чисел требует строгого соблюдения условий испытаний. Обязательным требованием является поддержание постоянного угла опережения зажигания. Для RON и MON установлены различные значения данного параметра. Особенности процесса горения водорода создают методические сложности. Экстремально высокая скорость распространения фронта пламени требует особого подхода. Существенная зависимость от коэффициента избытка воздуха усложняет процесс оценки.

Для газообразных топлив была разработана специальная шкала метановых чисел. В данной системе чистому метану присвоено значение 100. Водород по этой шкале имеет нулевое значение. Полученные данные вступают в

противоречие с некоторыми исследованиями октановых чисел. Это расхождение требует проведения дополнительных комплексных исследований.

Разработанные методики прогнозирования детонационных характеристик показали хорошие результаты. Экспериментальная проверка подтвердила точность прогнозов для различных параметров. Учитывались изменения степени сжатия и состава топливовоздушной смеси. Исследования включали анализ влияния температуры впускаемого воздуха.

Экспериментальные данные, представленные на рисунке 5, получены на специализированной установке. Одноцилиндровый исследовательский двигатель имел степень сжатия 12:1. Испытания проводились при 2000 об/мин и нагрузке 10 бар IMEP. Результаты демонстрируют характерные признаки детонационного сгорания. Зафиксированы значительные колебания давления в цилиндре. Амплитуда высокочастотных составляющих достигала 3,6 бар.

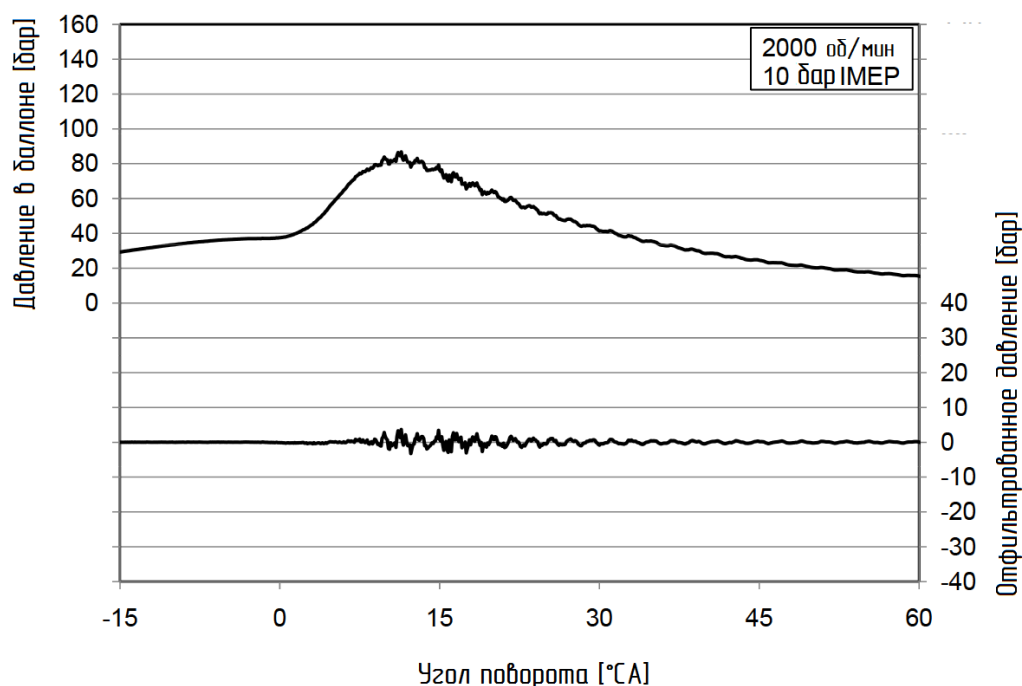


Рисунок 5 - Типичный график давления в цилиндре для легкого детонационного цикла

В условиях поддержания идентичных оборотов двигателя и приложенной нагрузки исследователями была зафиксирована конкретная рабочая точка. Данная рабочая точка отличалась наличием выраженного детонационного процесса, сопровождавшегося нестабильностью горения. Возникновение детонации в указанном режиме было обусловлено преднамеренным увеличением угла опережения зажигания, что визуализировано на рисунке 6. В стандартных условиях эксплуатации пиковое давление в цилиндре для данного режима обычно не превышает значения в 90 бар. Однако при переходе в режим детонации зафиксировано резкое возрастание максимального давления до уровня 150 бар. После применения фильтрации высокочастотных колебаний амплитуда остаточных пульсаций составила приблизительно 65 бар.

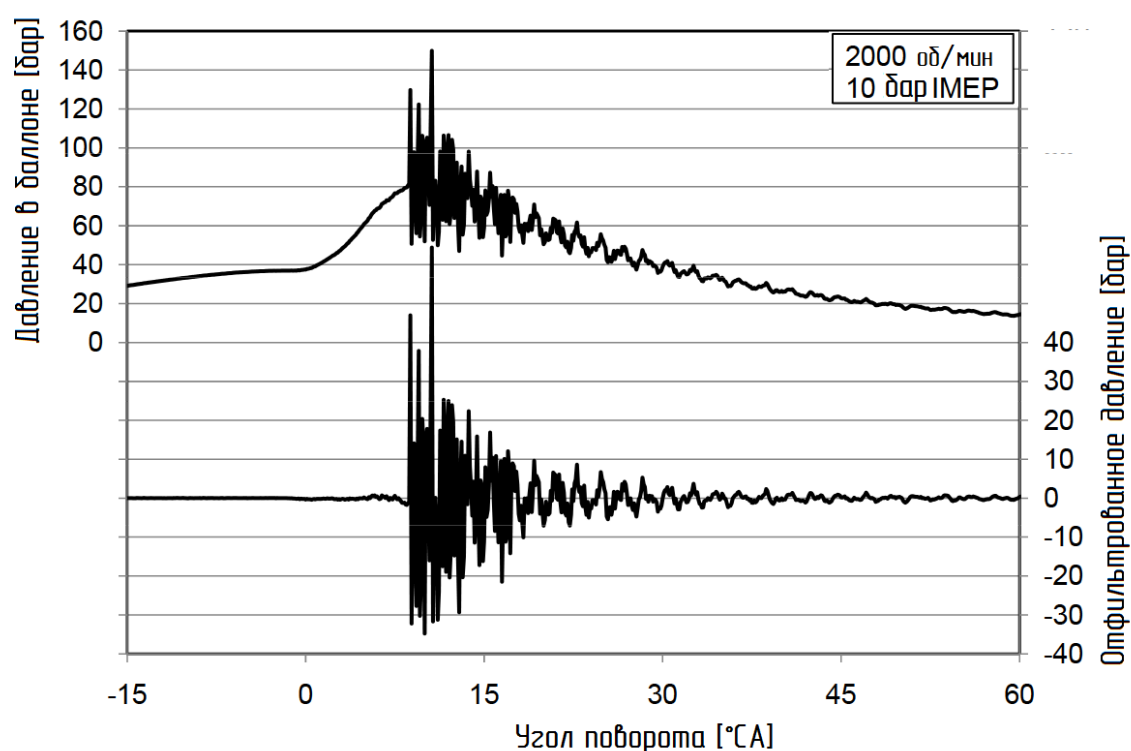


Рисунок 6 - Типичный график давления в цилиндре для тяжелого детонационного цикла

Серия экспериментов была проведена на одноцилиндровом двигателе CFR, используемом в исследовательских целях. Конструктивные особенности двигателя включали повышенный коэффициент сжатия, составлявший 12:1. Основной задачей экспериментальной работы являлось комплексное изучение детонационных характеристик водородного топлива. Параллельно проводилась оценка работоспособности стандартных автомобильных систем детектирования детонации при использовании водорода. Результаты сравнительного анализа интенсивности детонации бензина и водорода позволили выявить ряд важных закономерностей. Осциллограммы детонационных волн давления демонстрировали сопоставимые значения пиковых амплитуд для обоих видов топлива. Кроме того, наблюдалось статистически значимое сходство по параметрам временной продолжительности и скорости затухания колебательных процессов.

В целях предотвращения развития аномальных процессов горения в двигателях, работающих на водороде, ключевой мерой является регулирование максимального коэффициента эквивалентности топливовоздушной смеси. Особенностью водородных силовых установок является преимущественная эксплуатация в режиме обеднённого сгорания. Данная стратегия обусловлена уникальными характеристиками водорода, включая чрезвычайно широкие пределы воспламеняемости и высокую скорость распространения фронта пламени. Применение обеднённых смесей позволяет минимизировать энергетические потери, связанные с дросселированием впускного тракта.

Избыточное содержание атмосферного воздуха в рабочей смеси выполняет функцию инертного разбавителя, поглощающего тепловую энергию. Это приводит к существенному снижению пиковых температур процесса сгорания и, как следствие, тепловой нагрузки на элементы камеры сгорания. Таким образом, использование обеднённых топливовоздушных смесей статистически достоверно снижает вероятность возникновения аномальных

режимов горения. Однако необходимо учитывать, что данный метод управления процессом сгорания накладывает существенные ограничения на максимально достижимую мощность двигателя.

В ходе экспериментальных исследований был задействован четырёхцилиндровый рядный двигатель внутреннего сгорания объёмом 1,8 литра, оснащённый системой турбонаддува с промежуточным охлаждением. Сравнительные испытания проводились при работе силового агрегата как на традиционном бензиновом топливе, так и на газообразном водороде. Полученные результаты подтвердили, что поддержание оптимального эквивалентного соотношения топлива и воздуха является эффективным способом предотвращения аномальных процессов горения.

В рамках экспериментальных условий максимально допустимое значение коэффициента эквивалентности было установлено на уровне 0,63 ($\lambda = 1,6$) при частоте вращения коленчатого вала 1500 об/мин. При увеличении оборотов двигателя до 6000 об/мин данный параметр последовательно снижался, достигая минимального значения 0,48 ($\lambda = 2,1$). Применение указанной методики управления составом смеси продемонстрировало высокую эффективность в подавлении аномальных режимов горения. Вместе с тем, сравнительный анализ мощностных характеристик выявил существенное снижение максимальной мощности с 120 кВт при бензиновом питании до 70 кВт при работе на водородном топливе.

1.4 Мировой опыт применения водорода в автомобилях

Одним из первых удачных серийных автомобилей, работающих на водородном топливе, был автомобиль NECAR II (New Electric Car II) на топливных элементах Mercedes-Benz в середине 1990-х годов. С тех пор автопроизводители достигли многих важных вех в переходе на водородную

энергетику, пожалуй, ни одна из них не была столь примечательной, как автомобиль Chevrolet Equinox Fuel Cell от GM в 2007 году, работающий на водородных топливных элементах. Компоновка данного автомобиля показана на рисунке 7 [28].

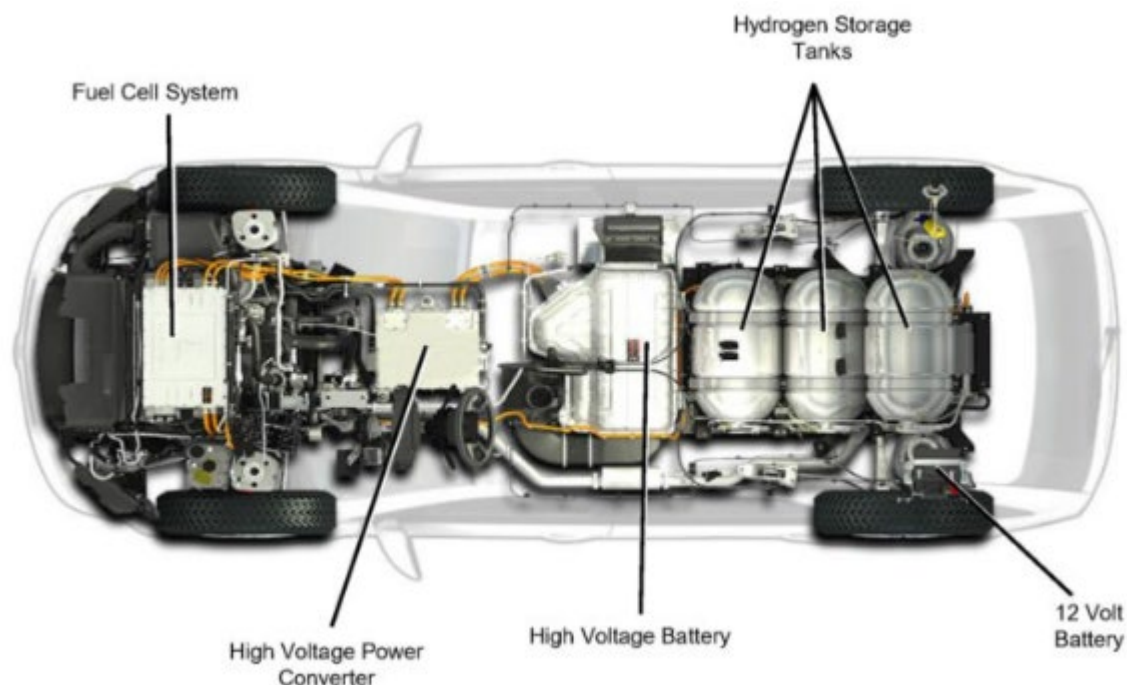


Рисунок 7 - Компоновка автомобиля Chevrolet Equinox Fuel Cell

С 2015 года три автомобиля на водородном топливе были предложены к продаже тремя различными автомобильными компаниями: Honda Clarity Fuel Cell, Hyundai Nexo SUV и Toyota Mirai. Но Honda уже прекратила производство всех моделей Clarity, а Hyundai продала всего около 1600 внедорожников Nexo за шесть лет [22].

Toyota, компания, наиболее преданная водородной энергетике как альтернативе электромобилям, продала в США около 14 300 седанов Mirai двух поколений, хотя в некоторые периоды она прибегала к значительным скидкам, чтобы продать их. (Honda не разграничивает продажи своей модели Clarity Fuel Cell с подключаемым гибридом и электромобилем Clarity.)

В 2024 году на рынок вышло новое водородное транспортное средство: Honda CR-V e:FCEV - это адаптация популярного компактного кроссовера, не только с водородным топливным элементом (совместно разработанным с GM), но и с более крупной батареей, которую можно подключать. Это обеспечивает 29 миль запаса хода, добавляя к 241 миле от топливного элемента. Прогнозируемый объем - 300 автомобилей в год.

Выводы по разделу 1.

Водород обладает уникальными термодинамическими свойствами, включая высокую энергетическую плотность (120 МДж/кг) и широкие пределы воспламеняемости ($\lambda = 0,14-10,5$), что делает его перспективным топливом для ДВС. Экологическая безопасность водорода подтверждается отсутствием выбросов CO_2 и токсичных соединений, что соответствует глобальным трендам декарбонизации. Высокая скорость горения водорода (до 3,25 м/с) обеспечивает повышенный КПД (37,5-43%) по сравнению с бензином (до 30%), но требует адаптации систем управления зажиганием. Основные проблемы применения связаны с низкой плотностью водорода (0,09 г/л), сложностями хранения (криогенные технологии) и высокой стоимостью инфраструктуры. Аномальные режимы горения (детонация, обратная вспышка, преждевременное воспламенение) ограничивают рабочий диапазон двигателей, но могут быть минимизированы стратегиями обеднения смеси ($\lambda > 2,0$). Экспериментальные исследования на двигателе CFR ($\epsilon = 12:1$) показали, что ограничение эквивалентного соотношения ($\phi \leq 0,63$) предотвращает детонацию, но снижает мощность на 42% (с 120 кВт до 70 кВт). Системы подачи водорода (распределенный и непосредственный впрыск) требуют оптимизации для снижения риска обратной вспышки, особенно при стехиометрических смесях. Мировой опыт демонстрирует медленное внедрение водородных авто (Toyota Mirai, Hyundai Nexo), что связано с высокой себестоимостью и недостаточной заправочной инфраструктурой.

2 Анализ модификации бензинового ДВС для работы на водороде

2.1 Конструктивные изменения двигателя

В настоящее время существуют автомобильные двигатели внутреннего сгорания (ДВС), работающие на водороде без использования топливных элементов, где водород сжигается непосредственно в камере сгорания, аналогично бензину или природному газу. Среди них можно выделить:

- BMW Hydrogen 7 (2006-2007): первый серийный автомобиль с водородным ДВС. Оснащён битопливным 6.0-литровым V12, работающим на водороде или бензине. Запас хода на водороде - до 200 км, мощность - 260 л.с.;
- Mazda RX-8 Hydrogen RE (2004-2012): роторный двигатель (Ванкеля) с системой dual-fuel (водород/бензин). Мощность на водороде - 109 л.с. (против 192 л.с. на бензине);
- Toyota (2023): анонсировала водородный 3.5-литровый турбодвигатель V8 для гоночного автомобиля Corolla Sport, участвующего в японской серии Super Taikyu. Двигатель сжигает водород, но имеет пониженную мощность (по сравнению с бензиновым аналогом) из-за низкой объёмной энергоёмкости водорода;
- JCB (2022): представила строительную технику с водородными ДВС, демонстрируя применимость технологии для тяжёлой техник.

В России практически единственным представителем водородного автомобиля являются автомобили ВАЗ Антэл-1 и Антел-2. Антэл-1 работал на кислороде и водороде, что повышало взрывоопасность установки и увеличивало её габариты. Поэтому Антэл-2 решили перевести с кислорода на воздух, что потребовало установки компрессора, позволившего поднять давление газа в баллонах с 250 до 400 атмосфер. В итоге водородно-воздушный Антэл-2 на

топливных элементах был заметно мощнее первой версии - 240В и 25 кВт соответственно. Благодаря этому максимальная скорость выросла до 100 км/ч, а запас хода увеличился до 350 км. Общая схема автомобиля Антей-2 показана на рисунке 8. Особенностью данного силового агрегата являлась подготовка автомобиля к эксплуатации: запуск установки Антэл-1 занимал около полутора часов - столько приходилось ждать, пока генератор прогреется до минимально допустимой рабочей температуры в 60 градусов; а на Антэл-2 установили специальные нагреватели, которые сократили время выхода на рабочий режим всего до 10-15 минут.



Рисунок 8 - Компоновка автомобиля Антей-2

2.2 Влияние водорода на рабочие параметры ДВС

В настоящее время научные исследования активно изучают ключевые направления, связанные с разработкой и совершенствованием систем сгорания водородного топлива. Данные системы находят практическое применение в двигателях внутреннего сгорания, что открывает новые перспективы для повышения их эффективности. Параллельно ведутся исследования,

направленные на внедрение предкамерных конструкций, которые могут значительно улучшить процесс горения [25].

Многочисленные экспериментальные данные свидетельствуют о значительном снижении концентрации угарного газа в выхлопных газах при использовании водородных добавок. Одновременно фиксируется увеличение энергетической эффективности силовых установок приблизительно на 10%. Однако негативным аспектом является рост выбросов оксидов азота, что требует дополнительного изучения. Анализ процессов сгорания водородсодержащих смесей позволяет предположить снижение концентрации всех вредных компонентов, за исключением NO. Оптимизация дозировки водородной добавки может способствовать уменьшению токсичности выхлопа и повышению КПД двигателя примерно на 4%.

Несмотря на активную разработку новых водородных силовых установок, традиционные ДВС продолжают эксплуатироваться. В данном контексте критически важным аспектом является обеспечение корректного распыления вводимых добавок для их полноценного сгорания.

Применение альтернативных топливных присадок, таких как этанол, также способствует снижению вредных выбросов. Однако проблема эмиссии NO сохраняется, несмотря на общее повышение КПД. В свете растущей популярности водородного топлива выбранное направление исследований представляется обоснованным. Современные тенденции в двигателестроении включают переход к монотопливным водородным ДВС.

В рамках данного исследования был рассмотрен дополнительный фактор, влияющий на динамику выбросов NO. Его целью являлось снижение воздействия изменений скорости горения на уровень эмиссии NO.

Важно отметить, что экономическая целесообразность применения водорода в ДВС достигается лишь при его получении из возобновляемых источников или как побочного продукта.

Исследования, проведенные в [25] показали следующие показатели влияния водорода на работу двигателя, в сравнении с другими видами топлива, сведены в таблицу 2 и 3.

Таблица 2 - Значение работы и эффективной мощности двигателя

Топливо	Работа А, кВт	Мощность Р, кВт
Бензин	32,29	8,36
Бензин + немного водорода	31,76	8,47
Бензин + много водорода	31,38	8,42
Бензин + немного водорода + EGR (рециркуляция отработанных газов)	30,21	8,36
Бензин + много водорода + EGR (рециркуляция отработанных газов)	29,86	8,41

Таблица 3 - Эффективность работы двигателя

Топливо	КПД, %	Увеличение показателя, относительно базового значения, %
Бензин	25,88	0,0
Бензин + немного водорода	26,68	3,09
Бензин + много водорода	26,83	3,67
Бензин + немного водорода + EGR	27,66	6,88
Бензин + много водорода + EGR	28,34	9,50

Водород, рассматриваемый в качестве альтернативного моторного топлива, демонстрирует ряд уникальных термодинамических и экологических характеристик. По сравнению с традиционными углеводородными топливами водород характеризуется значительно более высокой удельной теплотой

сгорания. Минимальная энергия, необходимая для воспламенения водородно-воздушной смеси, на порядок меньше, чем у бензиновых аналогов.

Диапазон воспламеняемости водородсодержащих смесей существенно превышает соответствующие показатели для углеводородных топлив. Эти свойства обуславливают высокую эффективность применения водорода в двигателях внутреннего сгорания, включая его использование в качестве топливной добавки. Однако эксплуатация ДВС на чистом водороде сопровождается заметным снижением мощностных показателей по сравнению с бензиновыми аналогами. Интенсивное горение стехиометрических водородно-воздушных смесей при высоких нагрузочных режимах может инициировать детонационные процессы. Данная особенность требует существенной модификации конструкции силового агрегата.

Оптимальная стратегия топливоподачи предполагает использование смесей с повышенным содержанием водорода на режимах холостого хода и частичных нагрузок. При увеличении механической нагрузки необходимо постепенное снижение концентрации водорода в смеси. На режиме полной мощности подачу водорода рекомендуется полностью прекращать. На рисунках 9 и 10 представлены экспериментальные зависимости экономических и эмиссионных характеристик четырехтактного бензинового двигателя (рабочий объем 2,45 л, степень сжатия 8,2) от состава бензино-водородно-воздушной смеси и массовой доли водорода в топливе. Полученные данные свидетельствуют о существенном влиянии состава топливной смеси на энергоэффективность и экологические показатели двигателя [13].

Рассмотрим результаты экспериментальных исследований, проведенных в НАМИ [13] с топливом БВТК.

БВТК (бензоводородная топливная композиция) - это смесевое топливо, представляющее собой комбинацию бензина с добавлением газообразного водорода.

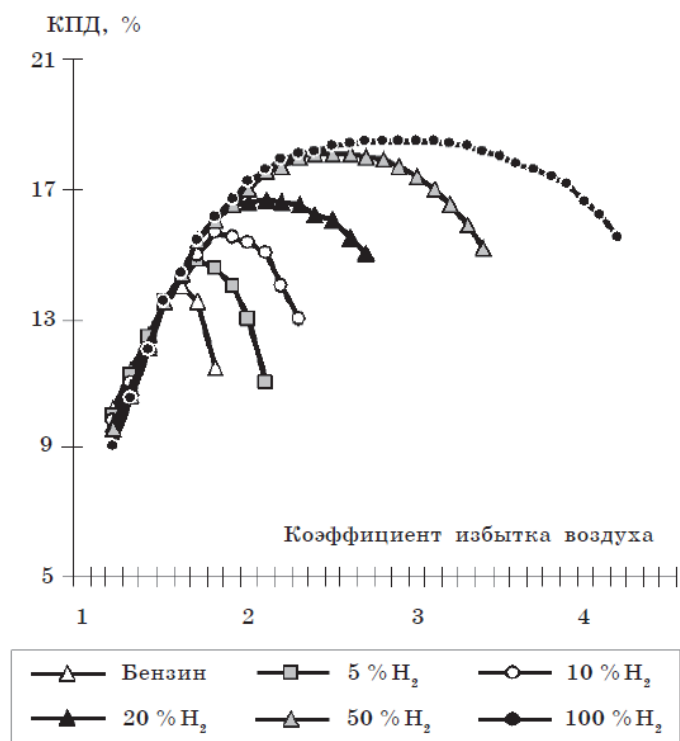


Рисунок 9 - Регулировочные характеристики двигателя по составу смеси при работе двигателя на БВТК ($N_e = \text{const}$, $n = \text{const}$)

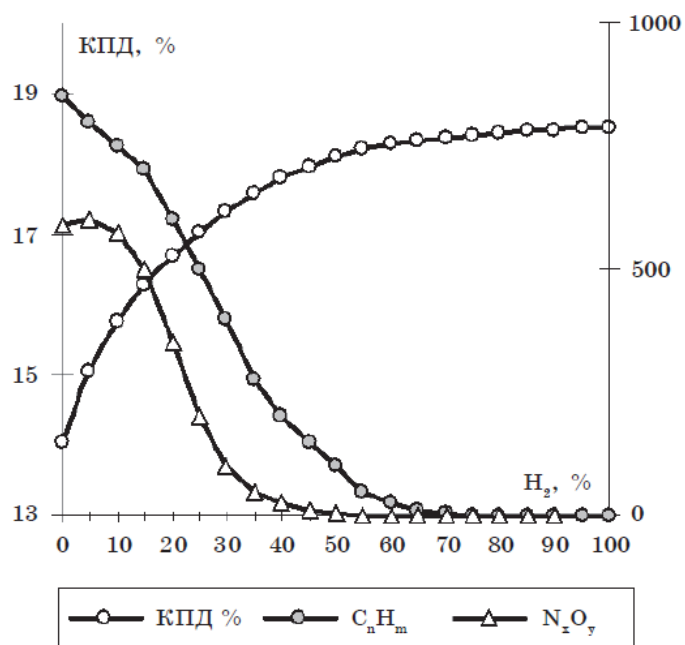


Рисунок 10 - Влияние добавки водорода на экономические и экологические показатели ДВС

В ДВС оно используется как переходный вариант между традиционными углеводородными топливами и чисто водородными системами.

Состав БВТК:

- основной компонент - автомобильный бензин (АИ-92/95/98);
- добавка - 5-30% газообразного водорода (H_2) по массе.

Экспериментальные исследования регуляторных характеристик силового агрегата проводились при стабильном значении выходной мощности 6,2 кВт. Частота вращения коленчатого вала поддерживалась на уровне 2400 оборотов в минуту в течение всех испытаний. Выбранные режимы работы максимально приближены к реальным условиям эксплуатации транспортного средства в городском цикле движения. Испытательная конфигурация воспроизводила условия движения автомобиля марки "Волга" с постоянной скоростью 60 км/ч по горизонтальному дорожному участку. Полученные графические зависимости наглядно иллюстрируют увеличение показателя эффективного коэффициента полезного действия при росте концентрации водорода в топливной смеси.

Максимальное значение коэффициента полезного действия, зафиксированное при работе на водородном топливе, составило 18,5%. Данный показатель превышает аналогичные значения для бензинового топлива на 32 %, где максимальный эффективный КПД не превышал 14%. Оптимальный состав смеси, соответствующий максимальной эффективности, характеризуется значительным обеднением топливовоздушной смеси.

При работе на бензине оптимальный коэффициент избытка воздуха (α) составлял 1,1, тогда как для водорода это значение достигало 2,5. Важным аспектом исследования стало изучение токсичности отработавших газов при частичных нагрузках. Результаты показали:

- концентрация оксида углерода (CO) снижалась практически до нуля при обеднении смеси независимо от типа топлива;

- содержание углеводородов C_nH_m существенно уменьшалось с ростом доли водорода;
- образование оксидов азота NO_x , не зависящее от вида топлива, снижалось при уменьшении температуры цикла.

Согласно таблицы 4, испытания микроавтобуса на стенде с беговыми барабанами по циклу ОСТ 037.001.054-74 продемонстрировали значительное улучшение экономических и экологических показателей при использовании БВТК:

- расход бензина снизился в 2,6 раза;
- топливная экономичность выросла на 28%;
- выбросы CO уменьшились в 23 раза;
- эмиссия углеводородов снизилась в 2,9 раза;
- выбросы NO_x сократились в 5,3 раза.

Таблица 4 - Результаты стендовых испытаний микроавтобуса (рабочий объем 2,45 л, степень сжатия 8,2) по циклу ОСТ 37001.57-74 на бензине и БВТК

Параметр	Серийный автомобиль на бензине	Доработанный автомобиль на БВТК
Содержание CO, г/испытание	88,00	3,93
Содержание C_nH_m , г/испытание	7,70	2,67
Содержание N_xO_y , г/испытание	12,00	2,3
Расход бензина, кг/100 км	13,50	5,18
Расход водорода, кг/100 км	-	1,65
Средняя концентрация водорода, %	-	24,00
Суммарный расход топлива в кДж/км	5940	4260

Следует отметить, что реальные условия эксплуатации в городской среде менее жесткие, чем стендовые испытания. Улучшение эффективности на частичных нагрузках может сделать применение БВТК экономически оправданным даже без учета экологических преимуществ.

2.3 Экологические показатели

В продолжение материала, изложенного в предыдущем подразделе, а также в [25], также были замеры экологических показателей работы двигателя, сравнительные результаты которого показаны в таблицах 5 и 6.

Таблица 5 - Состав выхлопных газов различных ДВС

Экологический параметр	Единицы измерения	Показатели относительно бензина, %				
		Бензин (100%)	Бензин + немного водорода	Бензин + много водорода	Бензин + немного водорода + EGR	Бензин + немного водорода + EGR
CO	%	0,90	93,33	96,97	87,78	77,78
HC	PPM	99,0	96,97	87,88	227,27	177,78
NO	PPM	100	109,56	104,37	10,96	11,27
CO ₂	%	13,9	97,84	93,53	117,27	93,53
O ₂	%	0,79	100,00	96,20	103,8	94,94

Таблица 6 - Сравнение водородного ДВС с другими типами двигателей

Показатель	Тип двигателя			
	Водородный ДВС	Водородный топливный элемент	Бензиновый ДВС	Дизельный ДВС
CO ₂	0 г/км	0	120-200 г/км	150-250 г/км
NO _x	10-50 мг/км	<10 мг/км	20-60 мг/км	50-300 мг/км
CO, CH	0	0	100-500 мг/км	50-200 мг/км
Твердые частицы	0	0	-	-

Выбросы при сгорании водорода в ДВС.

При сжигании водорода в традиционном ДВС основными продуктами сгорания являются:

- вода (H₂O) - основной выхлопной компонент;

- оксиды азота (NO_x) - образуются из-за высоких температур сгорания (аналогично бензиновым ДВС);
- минимальные выбросы CO_2 - если используется чистый водород (но возможны следовые количества из-за смазочных материалов);
- нет выбросов CO , CH , сажи - в отличие от бензиновых и дизельных ДВС.

Экологические проблемы водородных ДВС связаны с образованием NO_x - для их нейтрализации требуется катализатор, как в бензиновых автомобилях. Также возможны утечки водорода - возможны потери H_2 (парниковый эффект в долгосрочной перспективе).

Таким образом, экологичность водородного ДВС значительно выше, чем у бензиновых/дизельных аналогов, но уступает водородным топливным элементам из-за выбросов NO_x и меньшего КПД.

2.4 Экономическая целесообразность

Применение водородного топлива для легковых автомобилей имеет как потенциальные преимущества, так и серьезные экономические и технологические проблемы. Рассмотрим основные критерии экономической целесообразности.

Общепринято считать следующие преимущества водородного топлива:

- экологичность: при сжигании водорода или использовании топливных элементов (FCEV) выделяется только вода, что делает его перспективным для декарбонизации транспорта;
- высокая энергоемкость: удельная энергия водорода (~ 120 МДж/кг) значительно выше, чем у бензина (~ 44 МДж/кг);

- быстрая заправка: заправка водородом занимает 3-5 минут, что сопоставимо с бензином и быстрее зарядки электромобилей (более 30 минут на быстрой зарядке).

Экономические и технологические проблемы.

1. Высокая стоимость производства водорода.

«Зеленый» водород, получаемый электролизом с использованием в качестве источника электроэнергии ВИЭ (ветрогенератор), стоит 4...7\$/кг.

«Серый» водород (из природного газа) дешевле 1...2\$/кг, но его производство сопровождается выбросами CO₂.

Высокая стоимость доставки и хранения водорода: сжижение (-253°C) и транспортировка увеличивают цену до 10...15\$/кг. В результате на автомобильных заправках водород стоит в пересчете на 100 км. пути: в США и ЕС 13...16\$/кг, в Японии 10...12\$/кг. Для сравнения стоимость бензина на 100 км. пути составляет 5...8\$, а «заправка» электромобиля 2...4\$.

2. Дорогая инфраструктура.

Строительство одной водородной заправки обходится в 1...3 млн.\$ против 100-300 тыс.\$ для электрозаправки (как альтернативного топлива на данный момент).

В 2023 году в мире было всего около 1 000 водородных заправок, тогда как электрозаправок - миллионы.

3. Высокая стоимость автомобилей на водороде.

Водородные автомобили, например Toyota Mirai или Hyundai Nexo стоят 50...70 тыс.\$, что значительно дороже аналогичных электромобилей (например, Tesla Model3 - от 40 тыс.\$). Топливные элементы и системы хранения водорода (высокое давление, безопасность) увеличивают цену автомобиля.

4. Энергоэффективность: КПД водородного транспорта (от производства до колес) - 25-35%, тогда как у электромобилей - 70-90%. Это делает водород менее выгодным с точки зрения энергозатрат.

Когда же водород может быть экономически оправдан?

Грузовой транспорт (дальнобойные фуры, автобусы, поезда) - где важны быстрая заправка и большой запас хода.

Регионы с дешевой «зеленой» энергией (например, Исландия с геотермальной энергетикой).

Государственные субсидии (как в Японии, Южной Корее, ЕС).

Таким образом, на 2024-2025 годы водородные легковые автомобили не обладают достаточной экономической целесообразностью из-за:

- высокой стоимости водорода;
- дорогой инфраструктуры;
- конкуренции с электромобилями.

Однако в долгосрочной перспективе (после 2030-2035 гг.) ситуация может измениться, если:

- стоимость «зеленого» водорода упадет до 1...2\$/кг;
- появятся прорывы в технологиях топливных элементов;
- государства усилят поддержку водородной мобильности.

Пока же электромобили и гибриды остаются более выгодными для массового легкового транспорта.

В России дела с применением водорода в качестве автомобильного топлива обстоят очень плохо, практически никак.

Первые 100 заправочных станций для водородных автомобилей появятся в России в 2025 году. Об этом говорится в утвержденной правительством концепции по развитию производства электрического автотранспорта до 2030 года. Согласно информации, следующей из документа, с 2025 по 2027 годы будут строиться по 100 заправок в год. Уже в 2028 году откроют 300 штук, тогда как в 2029...2030 годах - еще по 200 водородных автозаправочных станций. «Реализацию направления государственной политики №7 предусматривается осуществить в 2025-2030 годах. Целевым показателем по

направлению государственной политики № 7 является установление до 2030 года не менее 1 тыс. штук водородных заправок», - говорится в документе, опубликованном 23 августа на сайте правительства РФ [8].

2 июля 2022 года, в официальном Telegram-канале московского департамента транспорта сообщалось, что в 2022 году в Москве начнут обкатывать первый водородный электробус. Отмечалось, что преимущества водородного электробуса очевидны: его использование снизит выбросы CO₂ более чем в 10 раз, при использовании выделяется только пар и тепло, а также он экономичен - требует заправки лишь раз в сутки. Результаты неизвестны.

В декабре 2020 года президент России Владимир Путин заявил о необходимости разработать новый водородный автобус. Глава государства отметил, что на сегодняшний день в больших городах используется много транспорта на дизельном топливе, который наносит ущерб экологии [8].

В 2025 году в России представили первую полностью отечественную водородную заправочную станцию. Презентация состоялась в рамках конференции «Топливные элементы и энергоустановки на их основе». Заправочная станция, рассчитанная на давление до 350 атмосфер, создана на основе локализованного электролизера с протонпроводящей мембраной, о чём сообщает издание Indicator.

Как рассказал глава компании «Поликом» Евгений Волков, заправочная станция полностью собрана в Черноголовке. На презентации показали модульное устройство заправочной станции, которое состоит из модуля заправки, генератора водорода на основе локализованного электролизера на протонообменной мембране и промежуточного накопителя. Электролизер имеет производительность от 2 до 10 м³ сверхчистого водорода в час. Заявлено, что его можно также применять в производстве микроэлектроники, для охлаждения генераторов электростанций и в некоторых других областях.

Источник добавляет, что первую водородную заправку показали несколько лет назад в черноголовском Центре компетенций НТИ «Новые и мобильные источники энергии» при ФИЦ ПХФ и МХ РАН (тогда - ИПХФ РАН), но та заправка была построена в Германии по техническому заданию Центра компетенций, а электролизный блок изготовили в «Поликоме». Новая заправка - на 100% российская [12].

Выводы по главе 2.

Существующие водородные ДВС (BMW Hydrogen 7, Mazda RX-8, Toyota V8, JCB) демонстрируют возможность модификации бензиновых двигателей, но с потерей мощности из-за низкой энергоёмкости водорода. Российские разработки (ВАЗ Антэл) требуют сложных доработок, включая системы хранения и предварительного нагрева. Использование водорода в ДВС значительно уменьшает выбросы CO и углеводородов (до 23 раз), но увеличивает концентрацию NO_x из-за высоких температур сгорания. Добавка водорода в топливную смесь повышает КПД двигателя на 3-10%, особенно при использовании системы рециркуляции отработавших газов (EGR). Наилучшие показатели достигаются при комбинированном использовании бензина и водорода (БВТК), где доля водорода варьируется в зависимости от режима работы двигателя. Водородные ДВС практически не производят CO₂, CO и сажи, но требуют катализаторов для снижения выбросов NO_x, что делает их чище бензиновых, но менее экологичными, чем топливные элементы. Высокая стоимость производства, хранения и транспортировки водорода делает его применение в легковом транспорте менее выгодным по сравнению с электромобилями. Водородные ДВС могут быть экономически оправданы в грузовом транспорте, автобусах и спецтехнике, где важны быстрая заправка и большой запас хода. Строительство водородных заправок требует значительных инвестиций (1-3 млн.\$ на станцию), что замедляет массовое внедрение технологии.

3 Экспериментальные исследования и перспективы внедрения

3.1 Методика проведения испытаний

Проанализируем экспериментальные исследования, описание которых представлены в [6, 11].

Проведено комплексное исследование динамики распространения пламени и его электропроводности с применением специализированного лабораторного оборудования, обеспечивающего высокую точность измерений. Параллельно осуществлялся анализ корреляционных зависимостей между указанными характеристиками и концентрацией углеводородных соединений (СН), а также оксидов азота (NO) в составе отработавших газов. В экспериментальной установке использовалась одноцилиндровая испытательная система УИТ-85, обладающая стандартизированными метрологическими характеристиками. Схематическое изображение данной установки приведено на рисунке 11, где отражена её принципиальная конструкция. Все испытания выполнялись на экспериментальном комплексе, разработанном для проведения подобных исследований. Основным элементом данного комплекса являлся одноцилиндровый бензиновый двигатель внутреннего сгорания. Конструкция двигателя включала в себя современную систему искрового зажигания, обеспечивающую стабильность рабочих процессов. Испытательная установка УИТ-85 характеризуется возможностью точной регулировки степени сжатия, что обеспечивает гибкость управления рабочими режимами двигателя. Данная система предоставляет возможность независимого контроля ключевых эксплуатационных параметров, влияющих на эффективность работы двигателя внутреннего сгорания. В число регулируемых параметров входит состав топливовоздушной смеси, определяющий качество сгорания и экологические показатели выбросов.



Рисунок 11 - Внешний вид установки УИТ-85

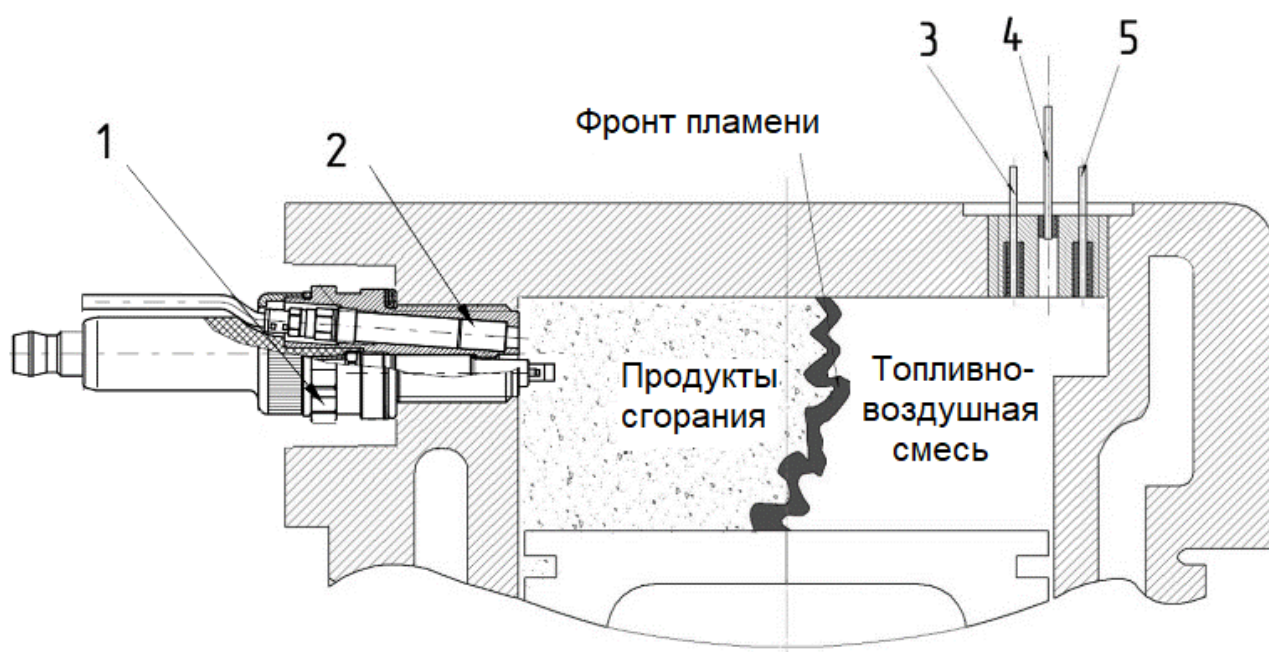
Дополнительно предусмотрена возможность изменения величины компрессии, что позволяет моделировать различные условия работы двигателя. Важной регулируемой характеристикой является частота вращения коленчатого вала, влияющая на динамические и энергетические показатели двигателя. Температурный режим системы охлаждения также поддается точной настройке, что обеспечивает стабильность тепловых процессов. Момент зажигания регулируется с высокой точностью, что позволяет оптимизировать процесс

воспламенения топливной смеси. Перечисленные функциональные возможности позволяют проводить комплексный анализ влияния различных факторов на процесс сгорания топлива. Кроме того, данная установка дает возможность исследовать механизмы образования оксидов углерода и азота в составе отработавших газов. В ходе экспериментальных исследований были использованы различные типы ионизационных датчиков, отличающихся конструктивными особенностями. В их число входят однокомпонентные датчики, обеспечивающие локальный контроль параметров пламени. Также применялись плавающие датчики, характеризующиеся повышенной чувствительностью к изменению условий сгорания. Стандартные одноэлектродные датчики использовались в качестве базового варианта для сравнительного анализа. Для более детального исследования применялись пятиэлектродные и трехэлектродные датчики, обладающие расширенными функциональными возможностями.

На рисунке 12 представлена схематическая конструкция камеры сгорания с переменным объемом, обеспечивающая гибкость экспериментальных исследований. В состав данной камеры интегрированы ионизационные датчики, предназначенные для регистрации характеристик пламени. Дополнительно установлен датчик давления, позволяющий фиксировать динамические изменения в процессе сгорания.

Чтобы измерить локальную турбулентную и стандартную скорости распространения огня и определить толщину пламени возле стенки сгорания, применялся трехэлектродный ионизационный датчик, изображение которого представлено на рисунке 13.

Для модификации свойств распространения огня в процессе сгорания, топливу добавляли водородные компоненты в пропорциях 0%, 3%, и 5%.



1 - источник зажигания, 2 - измеритель давления, 3 - ионизационный датчик, 4 - ионизационный датчик, 5 - ионизационный датчик

Рисунок 12 - Структура камеры сгорания, оснащённой ионизационными датчиками



Рисунок 13 - Трехэлектродный ионизационный датчик

В период проведения экспериментальных работ, проводилась фиксация сигналов, исходящих от ионизационного сенсора, системы искрообразования и устройства, определяющего положение коленвала. Визуализация методики регистрации данных иллюстрирована на рисунке 14.

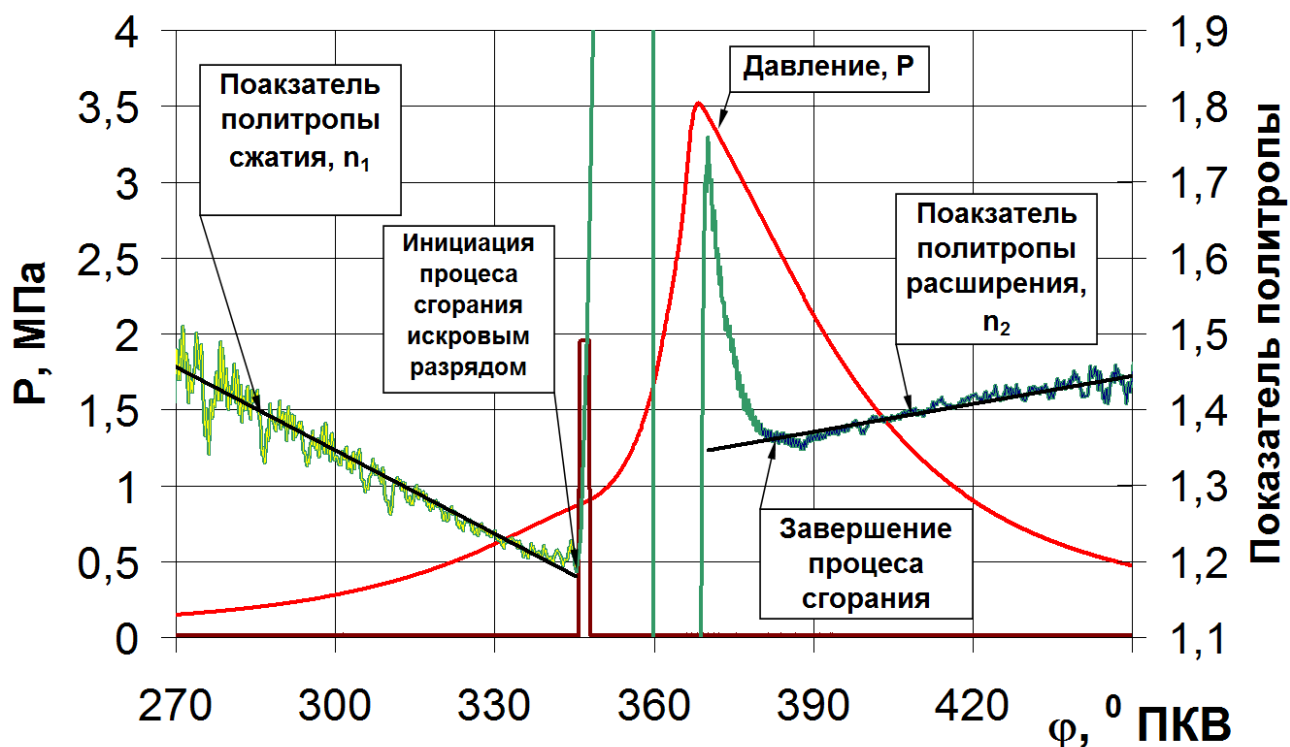


Рисунок 14 - Анализ колебания коэффициента политропического процесса в установке УИТ-85 при угле опережения зажигания 140 градусов по кривой и обогащении топливной смеси до соотношения 0,892 с учетом введения 3,38% водорода в массовом отношении к бензину

Измерение цилиндрического давления осуществлялось при помощи высокоточного пьезоэлектрического датчика давления, произведенного компанией Kistler, обеспечивающего высокую достоверность получаемых данных. Для определения локальных характеристик распространения фронта пламени в камере сгорания применялись специальные ионизационные датчики, регистрирующие изменение проводимости в зоне горения. Модификация

параметров процесса горения достигалась путем введения в топливную смесь водородной добавки в двух концентрациях: 3% и 5% от общей массы топлива, что позволяло варьировать скорость сгорания. В процессе исследований осуществлялась синхронная регистрация показаний со всех измерительных устройств. На рисунке 14 прослеживается характерный рост значения политропного показателя, обусловленного активизацией экзотермических реакций, что согласуется с [20]. После максимума наблюдается постепенное снижение показателя, переходящее в линейную зависимость.

Термодинамический анализ позволяет рассматривать систему цилиндра как изолированную в течение основных фаз цикла. Энергетические потери через поршневые кольца в данных условиях пренебрежимо малы. Интенсивность теплообмена существенно изменяется в зависимости от положения поршня и динамики сгорания. Характер теплопередачи адекватно описывается моделью политропного процесса [26].

Проведение исследований процесса сгорания в бензиновых ДВС связано с рядом сложностей. В работе использовалась установка УИТ-85 (степень сжатия 7, 600 об/мин). Полученные данные демонстрируют характерные изменения политропного показателя при различных режимах: сгорании обогащенной водородсодержащей смеси и горении обедненной смеси. В обоих случаях перед зажиганием наблюдается линейное уменьшение политропного показателя. После воспламенения регистрируется резкий рост, сменяющийся постепенным снижением. Критические точки 0 и 1 демонстрируют различия в динамике показателя для различных режимов горения.

3.2 Результаты экспериментов

В рамках научного эксперимента проводилось исследование влияния водородных добавок на процесс сгорания углеводородного топлива. В качестве

базовой экспериментальной установки использовалась модернизированная модель УИТ-85, работающая на бензиновом топливе. Для регистрации параметров рабочего процесса применялся высокоточный многоканальный аналого-цифровой преобразователь с высокой частотой дискретизации.

Одним из фиксируемых параметров являлся массовый расход воздуха, поступающего в камеру сгорания. Специальный датчик высокого напряжения регистрировал момент возникновения искрового разряда в системе зажигания. Для измерения давления в камере сгорания использовался прецизионный датчик производства компании Kistler, интегрированный в специальный адаптер свечи зажигания. Дополнительно в экспериментальной установке были задействованы три независимых ионизационных датчика. Анализ динамики процесса сгорания осуществлялся на основе комплексной обработки сигналов с различных датчиков, включая данные о моментах искрообразования, кривые давления в цилиндре и показания ионизационных сенсоров. Типичные временные зависимости зарегистрированных параметров представлены в графическом виде на рисунке 15.

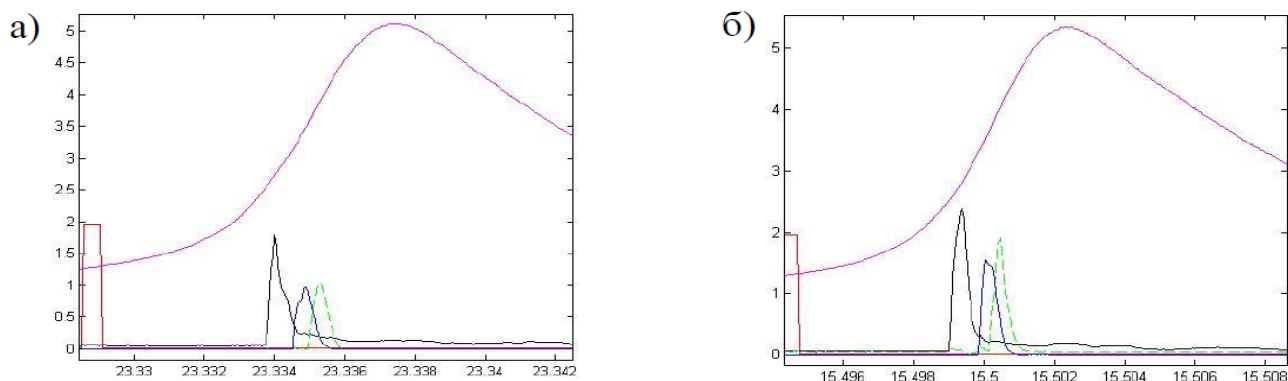


Рисунок 15 - Пример записи сигналов с датчика искрового разряда, датчика давления и датчиков ионизации, для режима: частота вращения 600 об/мин, степень сжатия 5,9, угол опережения зажигания 16 град. ПКВ, коэффициент избытка воздуха 1,0125 для: (а) топливо бензин; (б) топливо бензин с добавкой 2% водорода

Проведённый эксперимент подтвердил, что введение водородной добавки приводит к значительному повышению стабильности импульсов ионного тока. Кроме того, зафиксировано заметное увеличение скорости их формирования. Полученные данные свидетельствуют о существенном ускорении протекания химических реакций горения в пределах фронта пламени. Вследствие этого наблюдается выраженный рост концентрации заряженных частиц. Данный эффект проявляется в виде повышения стабильности регистрируемых сигналов с датчиков ионизации. Помимо этого, отмечается увеличение амплитуды измеряемых сигналов. Важно отметить, что временные характеристики сигналов сокращаются в сравнении с параметрами искрового разряда.

В рамках исследования изучается воздействие состава топливной смеси на кинетику процесса горения в установке УИТ-85. Сравнительный анализ проводился для двух типов топлива:

- чистого бензина;
- бензина с водородными добавками.

Одним из ключевых параметров, характеризующих процесс сгорания, является индикаторное давление. Графические материалы, представленные на рисунках 16...21, иллюстрируют влияние водородных добавок на пиковые значения давления в рабочем цикле. В ходе эксперимента применялись смеси с содержанием водорода в концентрациях 3% и 5%. Варьирование коэффициента избытка воздуха позволило оценить его роль в изменении параметров горения. Дополнительно исследовалось влияние угла опережения зажигания на динамику процесса. Экспериментальные данные также включали анализ воздействия степени сжатия на рабочие характеристики. Немаловажным фактором, учитывавшийся в исследовании, являлась частота вращения коленчатого вала.

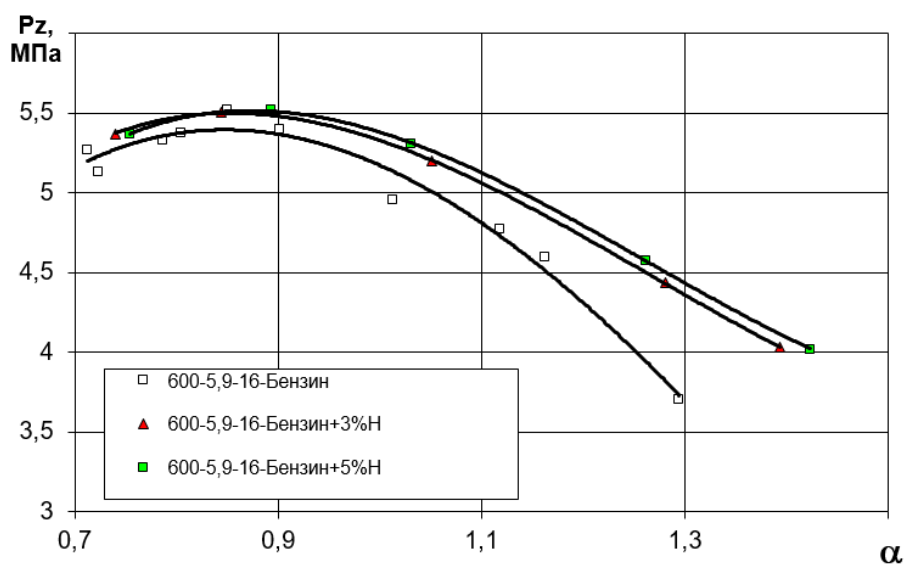


Рисунок 16 - Оценка влияния водорода на максимальное давление в цикле при варьировании коэффициентом избытка воздуха и угле опережения зажигания 16 град. ПКВ, степенью сжатия 5,9 и частоте вращения КВ 600 об/мин

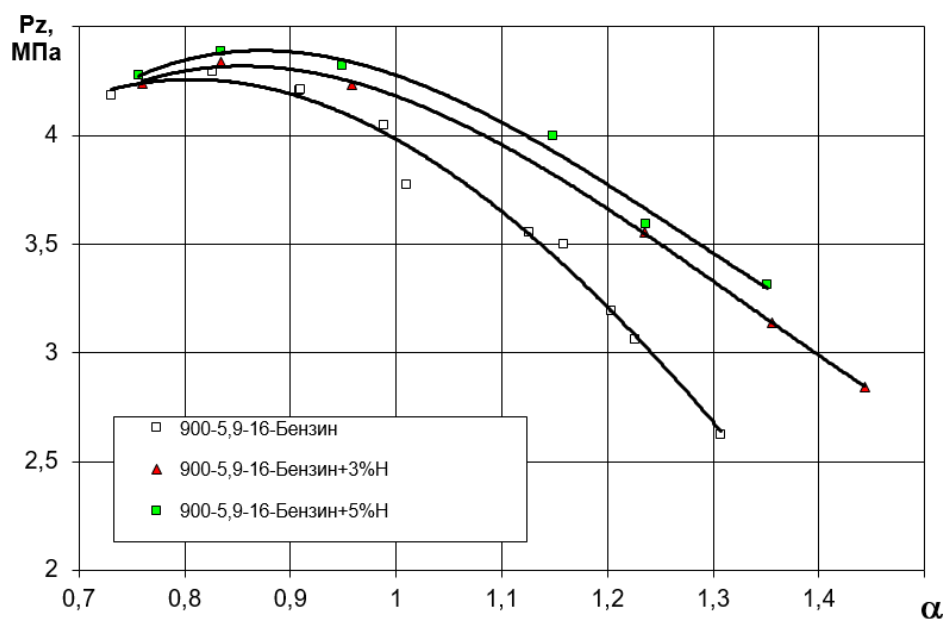


Рисунок 17 - Оценка влияния водорода на максимальное давление в цикле при варьировании коэффициентом избытка воздуха и угле опережения зажигания 16 град. ПКВ, степенью сжатия 5,9 и ЧВ КВ 900 об/мин

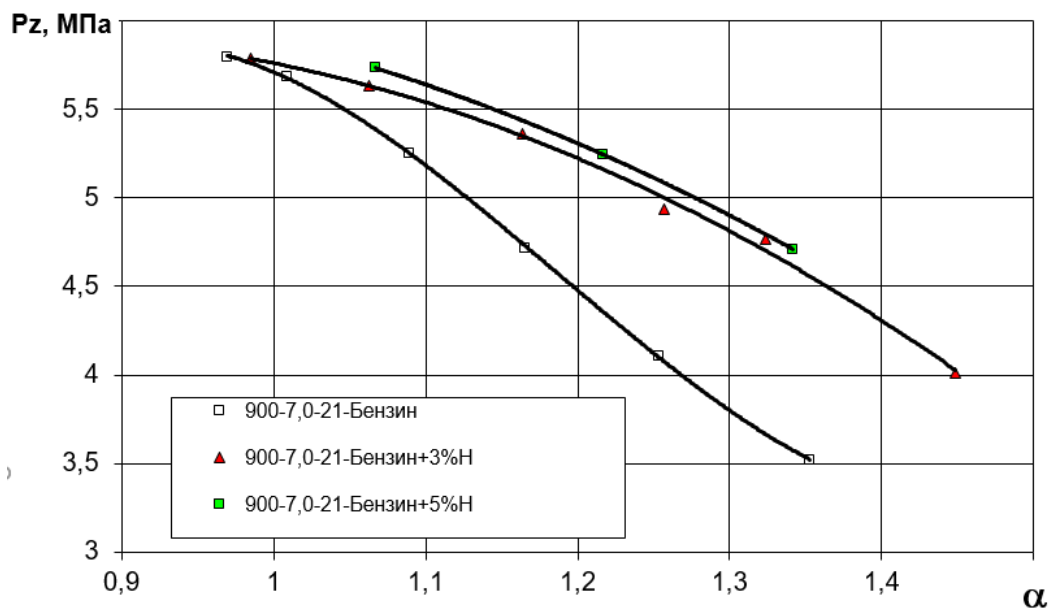


Рисунок 18 - Оценка влияния водорода на максимальное давление в цикле при варьировании коэффициентом избытка воздуха и угле опережения зажигания 21 град. ПКВ, степенью сжатия 7 и ЧВ КВ 900 об/мин

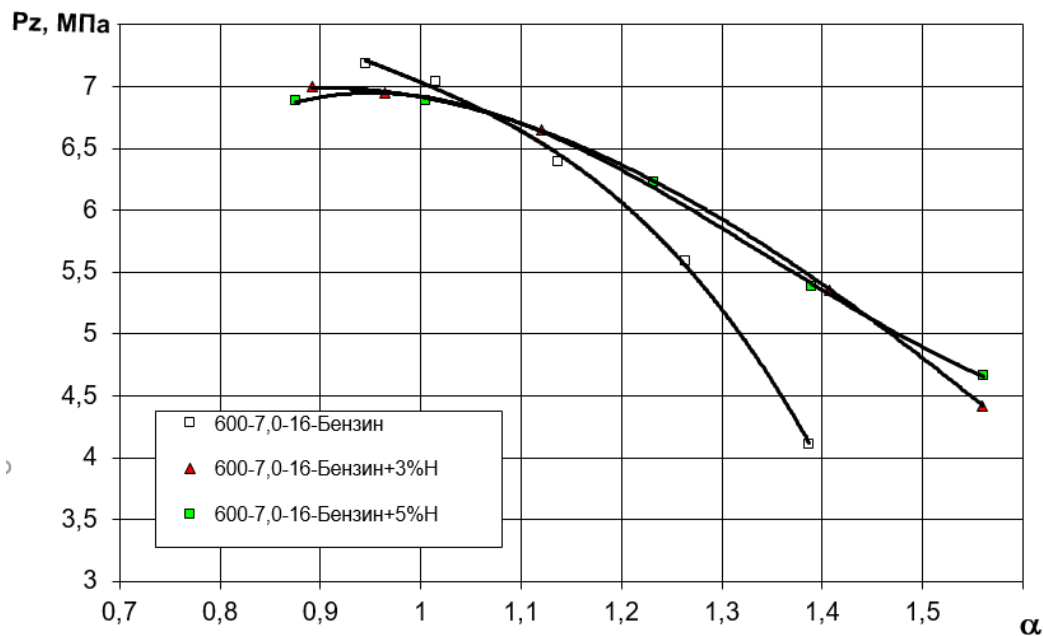


Рисунок 19 - Оценка влияния водорода на максимальное давление в цикле при варьировании коэффициентом избытка воздуха и угле опережения зажигания 16 град. ПКВ, степенью сжатия 7 и ЧВ КВ 900 об/мин

Проведенный анализ графических зависимостей на рисунках 16...19, позволяет установить статистически значимое увеличение пиковых значений индикаторного давления. Указанное увеличение обусловлено введением водородной добавки в состав топливной смеси. Данный эффект наблюдается во всех исследованных режимах работы двигателя. Сравнение добавок 3% и 5% водорода не выявляет существенных различий в их влиянии. Полученные результаты подтверждают гипотезу о каталитическом воздействии малых концентраций водорода.

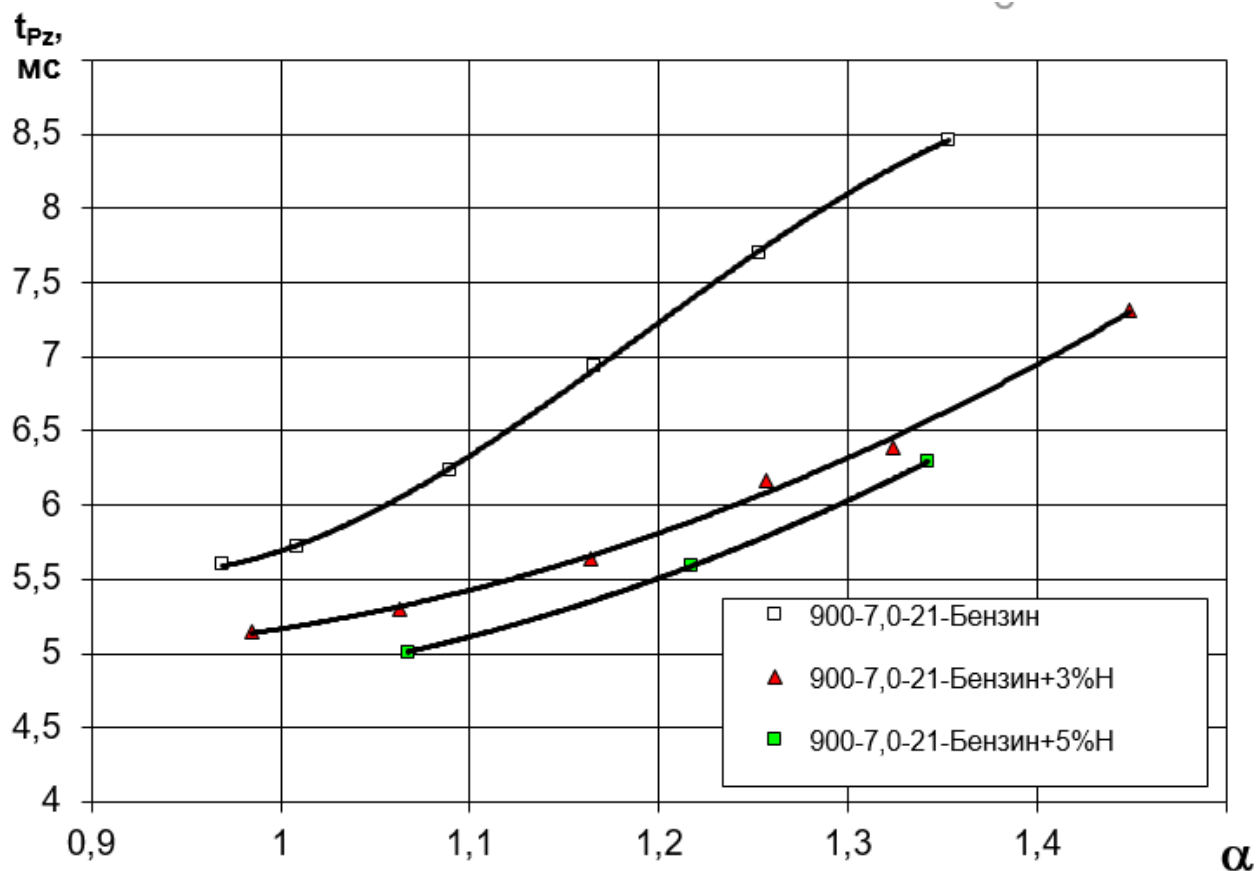


Рисунок 20 - Влияние добавки водорода на скоростные характеристики горения, а именно на время, соответствующее максимальному давлению в цилиндре двигателя при варьировании коэффициентом избытка воздуха и угле опережения зажигания 21 град. ПКВ, степенью сжатия 7 и ЧВ КВ 900 об/мин

На графиках, представленных на рисунках 20 и 21, анализируется влияние водородной добавки на кинетические характеристики процесса горения. В частности, рассматривается временной параметр, соответствующий достижению максимального давления в цилиндре двигателя. Экспериментальные данные свидетельствуют о заметном ускорении процесса сгорания при введении водорода. Наибольший эффект наблюдается при использовании минимальных концентраций водородной добавки. Дальнейшее увеличение содержания водорода приводит к снижению степени влияния на скорость горения.

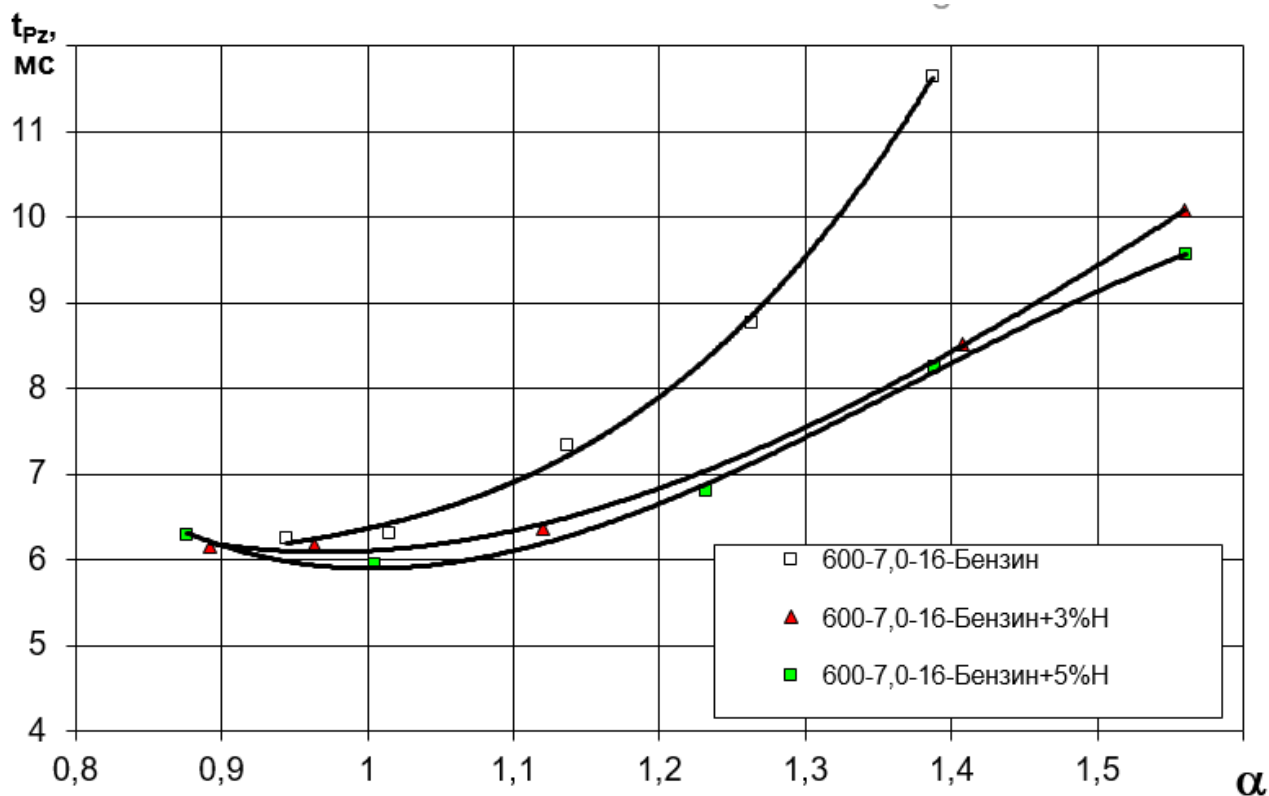


Рисунок 21 - Влияние добавки водорода на скоростные характеристики горения, а именно на время, соответствующее максимальному давлению в цилиндре двигателя при варьировании коэффициентом избытка воздуха и угле опережения зажигания 16 град. ПКВ, степенью сжатия 7 и ЧВ КВ 900 об/мин

3.3 Перспективы развития технологии

Наиболее перспективным направлением для снижения выбросов в транспортном секторе считаются гибридные энергетические системы, сочетающие водородные топливные элементы и электротягу [19, 29],

Использование водорода в гибридных установках позволяет компенсировать недостатки чистой электротяги, такие как ограниченный запас хода и длительное время зарядки. Комбинация водородных топливных элементов и аккумуляторных батарей обеспечивает высокий КПД и гибкость управления энергопотреблением в различных режимах работы. Внедрение гибридных водородно-электрических решений требует развития инфраструктуры, включая заправочные станции и системы хранения водорода. Перспективными областями применения гибридных систем являются грузовой транспорт, авиация и морские суда, где важны как экологичность, так и высокая энергоемкость топлива.

Рассмотрим результаты одного подобного исследования, изложенного в [18]. Был изготовлен испытательный автомобиль FV-E991, оснащенный водородными топливными элементами. Блок-схема гибридной силовой установки с топливными элементами представлена на рисунке 22. Рассматриваемая энергетическая система основана на применении современных водородных топливных элементов, осуществляющих генерацию электроэнергии электрохимическим способом. В состав системы дополнительно включена высокоемкостная тяговая аккумуляторная батарея, основной функцией которой является аккумуляция энергии, рекуперированной в процессе торможения. Для хранения водородного топлива используется специализированный криогенный резервуар, при этом топливная система обеспечивает подачу водорода в камеры топливных элементов, где протекает реакция окисления

кислородом. В результате данной электрохимической реакции происходит преобразование химической энергии в электрическую.

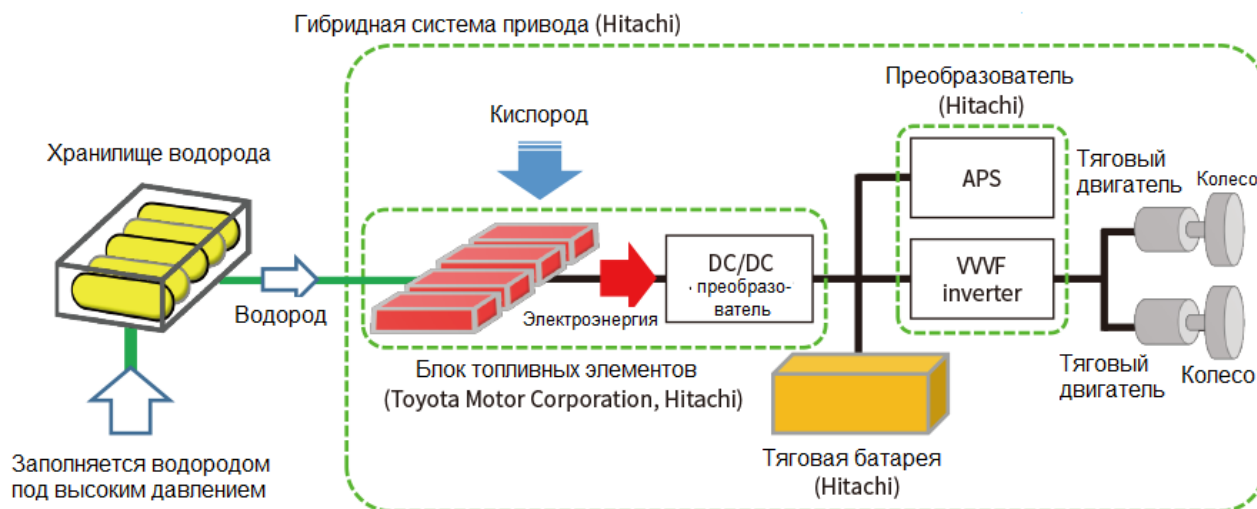


Рисунок 22 - Блок-схема гибридной силовой установки с топливными элементами

Заряд тяговой аккумуляторной батареи осуществляется как от генераторной установки на топливных элементах, так и за счет системы рекуперативного торможения. Преобразователь частоты VVVF выполняет ключевую функцию питания тягового электродвигателя, при этом данный инвертор может гибко использовать энергию от обоих источников. Вспомогательная система электропитания (APS) получает энергию от указанной комбинированной системы и обеспечивает подачу стабилизированного трехфазного тока напряжением 440 В для питания климатической установки, компрессорного оборудования, осветительных приборов и прочих вспомогательных потребителей.

Модель FV-E991 разработана с целью достижения тяговых характеристик, полностью сопоставимых с параметрами дизель-электрического гибридного агрегата HB-E210, эксплуатируемого в регионе Сэндай. На представленном

графике рисунка 23 четко прослеживаются тяговые характеристики системы при полной нагрузке (32 тонны). Конструктивные особенности позволяют поддерживать равновесную скорость движения, превышающую 100 км/ч при преодолении подъема крутизной 3‰, в то время как на более крутом уклоне 25‰ данный показатель составляет около 65 км/ч.

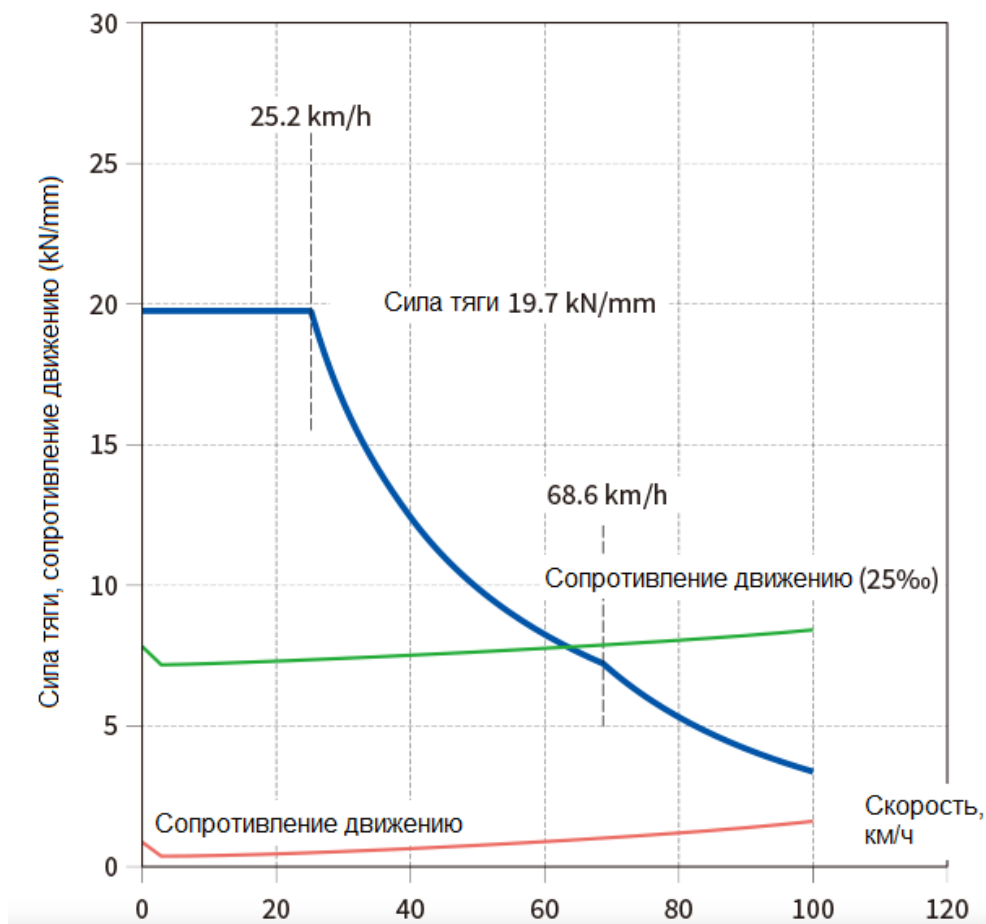
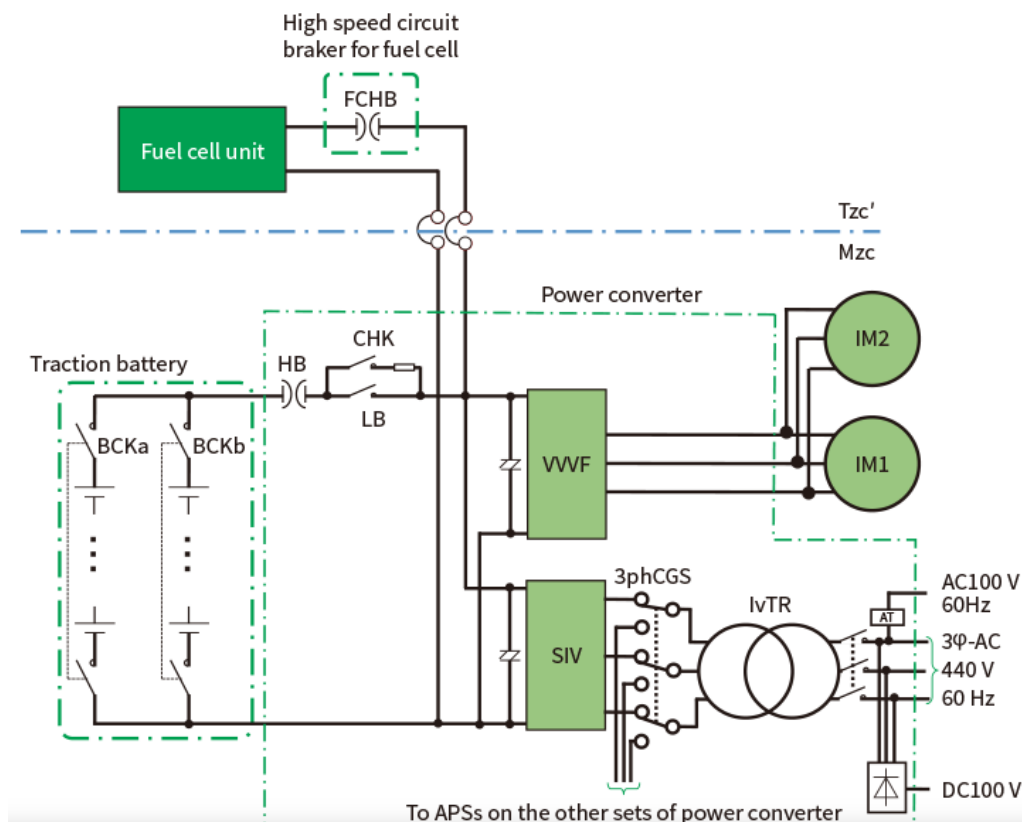


Рисунок 23 - Характеристики тягового усилия

В состав тяговой системы входят следующие ключевые компоненты: топливный элемент, высокоскоростной автоматический выключатель цепи топливного элемента (FCHB), тяговая литий-ионная батарея, инвертор VVVF и вспомогательный источник питания (APS), дополненный трансформаторным

оборудованием и фильтрующими цепями. Для обеспечения повышенной отказоустойчивости реализована схема с двумя полностью независимыми тяговыми контурами (конфигурация 1C2M). На структурной схеме рисунка 24 представлено устройство одного из таких контуров.



ИМ - асинхронный двигатель, IvTR - инверторный трансформатор, НВ - быстродействующий выключатель тока, FCHB - быстродействующий выключатель тока на топливных элементах, 3ph CGS - трехфазное распределительное устройство

Рисунок 24 - Блок-схема тяговой цепи

Система APS также характеризуется наличием резервирования, включая резервный питающий модуль, обеспечивающий бесперебойное электроснабжение при возникновении аварийных ситуаций. Переключение между основным и резервным источниками APS осуществляется посредством трехфазного коммутационного устройства (3ph CGS). Все бортовые системы

получают питание через инверторный трансформатор (IvTR) от активного источника APS. Для эффективного подавления возможных резонансных явлений между инвертором VVVF и фильтрующей емкостью APS применена усовершенствованная общая зарядная цепь с прямым подключением к обоим устройствам. Топливные элементы подключены к тяговой системе через автоматический выключатель FCHB, который выполняет важную защитную функцию, оперативно отключая цепь при возникновении опасных токовых перегрузок.

3.4 Рекомендации для автопроизводителей

Внедрение водородных легковых автомобилей (FCEV - Fuel Cell Electric Vehicles) требует комплексного подхода, включающего технологические, инфраструктурные и экономические аспекты. Рассмотрим возможные варианты реализации.

Технологические схемы.

Чистые водородные FCEV [14].

Принцип работы: топливный элемент преобразует H_2 в электричество, питая электромотор.

Преимущества:

- быстрая заправка (3-5 минут);
- большой запас хода (500-800 км);
- нулевые выбросы (только H_2O).

Примеры: Toyota Mirai, Hyundai Nexo, Honda Clarity.

Гибриды (FCEV + аккумулятор) [16].

Принцип работы: комбинация топливного элемента и Li-ion батареи.

Преимущества:

- повышенный КПД за счет рекуперации;

- снижение нагрузки на топливный элемент.

Пример: BMW iX5 Hydrogen (2025).

Водородные ДВС (H_2 -ICE) [23].

Принцип работы: двигатель внутреннего сгорания, работающий на H_2 .

Преимущества:

- дешевле FCEV;
- возможность модернизации бензиновых автомобилей.

Недостатки:

- низкий КПД (~35-40%);
- выбросы NO_x .

Пример: Toyota Corolla H_2 (спортивный прототип).

Инфраструктурные модели.

Очаговая (кластерная) модель [7].

Суть: развитие заправок в мегаполисах и промышленных зонах.

Где применяется:

- Япония (Токио, Осака - 160+ заправок);
- Калифорния (60+ станций);
- Германия (90+ заправок).

Коридорная модель.

Суть: сеть АЗС вдоль ключевых автострад.

Примеры:

- ЕС: Берлин - Мюнхен - Париж;
- США: Лос-Анджелес - Сан-Франциско.

Домашние мини-станции [3].

Суть: компактные электролизеры для заправки в гараже.

Плюсы:

- независимость от инфраструктуры;
- использование "зеленого" H_2 .

Пример: Honda Home Energy Station [21].

Экономические механизмы стимулирования.

Субсидии на покупку:

- Япония: до \$20 тыс. за FCEV;
- Германия: €9,000 + льготный лизинг [2];
- Калифорния: \$4,500-7,000 скидки.

Налоговые льготы:

- освобождение от транспортного налога;
- снижение НДС на водород (ЕС - 5-7% вместо 20%).

Поддержка инфраструктуры:

- гранты на строительство АЗС (ЕС - до 70% стоимости);
- льготные тарифы на электроэнергию для электролиза.

Этапы коммерциализации (возможные) [9].

- с 2025 по 2030 год: пилотные проекты, развитие инфраструктуры в ключевых городах;
- с 2030 по 2035 год: массовый выпуск FCEV (цена сравнивается с электромобилями);
- после 2035 года: доминирование в сегменте премиум-авто и коммерческого транспорта.

К 2030 году водородные авто могут занять 5-10% рынка в Европе, Японии и Калифорнии, с перспективой роста до 20-30% к 2040 году в сегменте премиум и дальнобойных моделей [4].

Выводы по разделу 3.

Таким образом, наиболее перспективными направлениями развития водородного транспорта являются:

- гибридные FCEV - оптимальный баланс цены и эффективности;
- кластерное развертывание - старт с мегаполисов и магистралей;
- господдержка - ключевой фактор снижения стоимости владения.

Заключение

Водород обладает уникальными термодинамическими свойствами: высокой энергетической плотностью (120 МДж/кг), широкими пределами воспламеняемости ($\lambda = 0,14-10,5$) и экологической чистотой (отсутствие выбросов CO_2 и токсичных веществ). Однако его применение в ДВС требует модификации систем подачи топлива и управления зажиганием из-за высокой скорости горения (до 3,25 м/с) и риска аномальных режимов сгорания (детонация, обратная вспышка).

Преимущества водорода перед другими видами топлива:

- повышенный КПД (37,5-43%) по сравнению с бензиновыми ДВС (до 30%);
- снижение выбросов CO и углеводородов (до 23 раз при использовании БВТК);
- возможность работы на обеднённых смесях ($\lambda > 2,0$), что уменьшает тепловые нагрузки.

Недостатки водорода перед другими видами топлива:

- снижение мощности на 42% из-за низкой объёмной энергоёмкости водорода;
- риск образования NO_x при высоких температурах сгорания;
- технологические сложности хранения (криогенные системы, высокое давление).

Водородные ДВС обладают значительным экологическим потенциалом, но их массовое внедрение требует решения технологических и экономических проблем. В среднесрочной перспективе наиболее реалистичным направлением является использование водорода в коммерческом транспорте и гибридных системах.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Альтернативные источники энергии: все что нужно знать о трендовом векторе развития в энергетике [Электронный ресурс] : информационный ресурс «Energy-wind». URL: <https://energy-wind.md/ru/alternativnye-istochniki-jenergii-vse-chto-nuzhno-znat-o-trendovom-vektore-razvitija-v-jenergetike/> (дата обращения: 03.02.2025).

2. Водородная республика Германия [Электронный ресурс] : информационный ресурс «Атомный эксперт». URL: https://atomicexpert.com/hydrogen_republic_of_germany (дата обращения: 05.04.2025).

3. Генераторы водорода методом электролиза (электролизеры) [Электронный ресурс] : информационный ресурс «Грасис». URL: <https://www.grasys.ru/products/vodorodnye-ustanovki/elektroliznyj-generator-vodoroda/> (дата обращения: 24.03.2025).

4. К 2030 году каждый десятый продаваемый грузовик в Европе будет ездить на водороде [Электронный ресурс] : информационный портал «Альтернативная энергетика и экология (ISJAEЕ)». URL: https://www.isjaee.com/jour/announcement/view/163?locale=ru_RU (дата обращения: 12.04.2025).

5. Конструирование двигателей внутреннего сгорания: учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности "Двигатели внутреннего сгорания" направления подготовки "Энергомашиностроение" / Н. Д. Чайнов, Н. А. Иващенко, А. Н. Краснокутский, Л. Л. Мягков; под ред. Н. Д. Чайнова. - 3-е изд. - Москва: Машиностроение, 2023. - 495 с.

6. Макарчук А.В. Современные вопросы применения водорода в поршневых ДВС: дис. ... магистр. 13.04.03 / Макарчук А.В. — Тольятти, 2024. — 86 с.

7. Макарян И.А., Седов И.В. Состояние и перспективы развития мировой водородной энергетики // Российский химический журнал. 2021. №2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sostoyanie-i-perspektivy-razvitiya-mirovoy-vodorodnoy-energetiki> (дата обращения: 14.05.2025).

8. Первые водородные заправки в России появятся в 2025 году [Электронный ресурс] : информационный ресурс «Известия». URL: <https://iz.ru/1211163/2021-08-23/pervye-vodorodnye-zapravki-v-rossii-poiaviatsia-v-2025-godu> (дата обращения: 10.02.2025).

9. Перспективы водородного транспорта. Круглый стол [Электронный ресурс] : информационный портал «i.Грейдер». URL: <https://igrader.ru/komtrans/perspektivy-vodorodnogo-transporta/> (дата обращения: 06.04.2025).

10. Петров А. И. Техническая термодинамика и теплопередача: учебник / А. И. Петров. - Изд. 2-е, стер. - Санкт-Петербург: Лань, 2023. - 428 с.

11. Петросян М.Ф. Анализ перспектив применения водорода в автомобильных двигателях: дис. ... магистр. 13.04.03 / Петросян М.Ф. — Тольятти, 2023. — 71 с.

12. Представлена первая на 100% российская водородная заправочная станция [Электронный ресурс] : информационный ресурс «IXBT.com». URL: <https://www.ixbt.com/news/2023/09/21/predstavlena-pervaja-na-100-rossijskaja-vodorodnaja-zapravochnaja-stancija.html> (дата обращения: 11.02.2025).

13. Раменский А.Ю., Шелищ П.Б., Нефедкин С.И. Применение водорода в качестве моторного топлива для автомобильных двигателей внутреннего сгорания. История, настоящее и перспективы // АЭЭ. 2006. №11. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-vodoroda-v-kachestve-motornogo-topliva-dlya-avtomobilnyh-dvigatelay-vnutrennego-sgoraniya-istoriya-nastoyashee-i> (дата обращения: 12.05.2025).

14. Сравнение технологий EV и FCEV [Электронный ресурс] : информационный ресурс «ProVolta». URL: <https://provolta.ru/budushhee-elektromobili-ili-vodorodnye-dvigateli/> (дата обращения: 21.03.2025).
15. Стандарт Евро 7: все, что вам нужно знать о новых экологических требованиях. URL: <https://gazetaznamya.ru/blogi/vse-ob-avtomobiljah/standart-evro-7-vse-chto-vam-nuzhno-znat-o-novyh-ekologicheskikh-trebovaniyah.html> (дата обращения: 02.01.2025).
16. Что такое PHEV, BEV и FCEV — какими бывают гибридные автомобили [Электронный ресурс] : информационный ресурс «Techinsider». URL: <https://www.techinsider.ru/technologies/649243-chto-takoe-phev-bev-i-fcev-kakimi-byvayut-gibridnye-avtomobili/> (дата обращения: 22.03.2025).
17. Шелмаков С.В. Улучшение энерго-экологических характеристик автомобилей: учеб. пособие / С.В. Шелмаков - М.: МАДИ, 2018. - 282 с. URL: <http://eco-madi.ru/sites/default/files/%20%D0%A3%D0%BB%D1%83%D1%87%D1%88%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5%20%D1%8D%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%BE%B5%D0%B9.pdf> (дата обращения: 01.02.2025).
18. Development of Traction System for Rolling Stock Using Hydrogen Fuel Cells. Hitachi Review. Technical Information. February 2024. URL: <https://www.hitachihyoron.com/rev/papers/2024/02/02/index.html> (дата обращения: 14.03.2025).
19. H. Mitsumoto, et al., “Development of hybrid system for FV-E991 series (HYBARI),” JR EAST Technical Review, No. 69 pp. 11-13 (Mar. 2023) in Japanese.
20. Harrison, R.M., Tilling, R., Callen Romero, M.S., Harrad, S. and Jarvis, K. 2003; A study of trace metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in the roadside environment. Atmospheric Environment 37 (17): pp 2391-2402.
21. Honda Introduces Experimental Home Energy Station IV [Электронный ресурс] : информационный ресурс «Honda. The Power of Dreams». URL:

<https://global.honda/en/newsroom/worldnews/2007/4071114Experimental-Home-Energy-Station.html> (дата обращения: 25.03.2025).

22. Hydrogen Fuel-Cell Vehicles: Everything You Need to Know. By John Voelcker Updated: Apr 29, 2024. URL: <https://www.caranddriver.com/features/a41103863/hydrogen-cars-fcev/> (дата обращения: 13.02.2025).

23. Iveco S-Way с водородным ДВС [Электронный ресурс] : информационный ресурс «Truck & Bus». URL: https://truck-and-bus.ru/news/new_items/46915/ (дата обращения: 23.03.2025).

24. Levikhin A.A., Boryaev A.A. Physical properties and thermodynamic characteristics of hydrogen, Heliyon, Volume 10, Issue 17, 2024, e36414, ISSN 2405-8440. URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36414>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844024124450>) (дата обращения: 03.02.2025).

25. Maciej Paluch, Marcin Noga¹. Influence of hydrogen addition on performance and ecological parameters of a spark-ignition internal combustion engine at part load typical for urban traffic. Advances in Science and Technology Research Journal, 2025, 19(3), 262-270. URL: <https://doi.org/10.12913/22998624/199738> (дата обращения: 11.03.2025).

26. Pang et al., Review of engine cooling technologies for modern engines. Journal of automotive engineering, Vol 218, Part D (2004).

27. Sun Hai. Hydrogen energy is arousing great attention all over the world. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 46 (3): 2845 - 2846.

28. What It's Like to Drive on Hydroge, by Ron Cogan | March 7, 2022 URL: <https://greencarjournal.com/alternative-fuels/what-its-like-to-drive-on-hydrogen/> (дата обращения: 13.02.2025).

29. Y. Ohtake, et al., “Fuel Cell Traction System for JR-EAST FV-E991,” Proceedings of 59th Symposium of Congress of Japan Railway Cybernetics, No. 502, (Nov. 2022) in Japanese.
30. Yi Qing, Wang Wei, Fei Youzhi, et al. Application and popularization of hydrogen internal combustion engine. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2021, 1: 219 - 221.