

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

Институт машиностроения
(наименование института полностью)

Кафедра «Проектирование и эксплуатация автомобилей»
(наименование)

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 ДВС для легкового автомобиля,
работающего на природном газе

Обучающийся

С.С. Саодатзода
(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

канд. техн. наук, доцент А.В. Бобровский
(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2025

Аннотация

Бакалаврская работа выполнена на тему: «Перспективы применения водорода в ДВС для легкового автомобиля, работающего на природном газе».

Цель работы: исследование возможности и эффективности использования водорода в качестве добавки к природному газу в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) легковых автомобилей с целью повышения экологичности и энергетической эффективности.

Основные задачи работы:

- анализ современных технологий применения водорода и природного газа в ДВС;
- изучение влияния водородной добавки на характеристики работы двигателя (мощность, КПД, выбросы вредных веществ);
- оценка технико-экономической целесообразности использования водородно-газовых смесей.

Объект работы: двигатель внутреннего сгорания легкового автомобиля, работающий на природном газе с добавлением водорода.

Методы исследования:

- анализ технической и патентной документации;
- компьютерное моделирование (CAD/CAE-системы).

Практическая значимость: результаты работы могут быть использованы для оценки возможности модернизации существующих газовых ДВС под водородно-метановые смеси.

Структура работы включает введение, три раздела основного содержания, заключение, список используемой литературы и используемых источников, приложение.

В первом разделе рассмотрен природный газ, как перспективное моторное топливо для автомобильного транспорта, что подтверждается его

экологическими и экономическими преимуществами по сравнению с традиционными нефтепродуктами.

Второй раздел посвящён применению водорода в автомобильном транспорте. Рассматривается история развития водородных технологий в СССР и Российской Федерации, современное состояние водородной индустрии, включая производство и перспективы использования, а также применение водородных добавок в сжатый природный газ.

В третьем разделе рассматривается процесс водородонасыщения природного газа на автомобильных газонаполнительных компрессорных станциях. Анализируются технологические аспекты смешивания водорода с природным газом и его влияние на работу заправочной инфраструктуры.

Пояснительная записка на 61 страницу, объем графической части составляет 6 листов формата А1.

Abstract

The topic of the given graduation project is: «The prospects of hydrogen application in internal combustion engines for passenger cars running on natural gas».

The aim of the project is to analyze the potential of hydrogen as an additive to compressed natural gas (CNG) for improving the efficiency and environmental performance of internal combustion engines (ICEs) in passenger vehicles.

The graduation project may be divided into several logically connected parts: an introduction, three general parts, a conclusion, a list of references, and a graphic part.

The graphic part is presented on 6 A1 sheets, which performed in the engineering software «KOMPAS-3D». The graduation work fully complies with the approved assignment.

In the first part of the graduation project, the current state of natural gas usage as a motor fuel in the automotive sector is examined, including the advantages of CNG over other alternative fuels and government incentives promoting its adoption.

In the second part, the application of hydrogen in the automotive industry is explored, covering its historical development in the USSR and Russia, the current state of hydrogen production and utilization, and the benefits of hydrogen-enriched CNG blends.

The third section focuses on hydrogen enrichment of natural gas at automotive refueling stations, detailing the infrastructure of CNG refueling stations and the technical aspects of hydrogen-CNG blending.

This research contributes to understanding the potential of hydrogen-CNG mixtures as a transitional solution toward cleaner and more sustainable mobility.

Содержание

Введение.....	6
1 Состояние вопроса	9
1.1 Использование природного газа в качестве моторного топлива на автомобильном транспорте	9
1.2. Преимущество компримированного природного газа над другими альтернативными видами топлива	10
1.3 Государственные меры стимулирования использования компримированного природного газа (КПГ) в транспортном секторе	12
2 Применение водорода для автомобильного транспорта.....	14
2.1 История и развитие водородных технологий в СССР и России	14
2.2 Современное состояние водородной индустрии: производство и перспективы использования	16
2.3 Добавки водорода в компримированный природный газ.....	19
3 Водородонасыщение природного газа на автомобильной газонаполнительной компрессионной станции	23
3.1 Автомобильные газонаполнительные компрессорные станции	23
3.2 Заправка компримированного природного газа на автомобильной газозаправочной станции	41
Заключение	58
Список используемой литературы и используемых источников.....	59

Введение

Современный транспортный сектор представляет собой один из ключевых факторов негативного воздействия на экологию. В урбанизированных зонах именно подвижные источники загрязнения – включая легковой и грузовой автотранспорт, спецтехнику и сельскохозяйственные машины – формируют основную долю вредных выбросов. Особую опасность представляет концентрация отработавших газов в приземном атмосферном слое, что создает прямую угрозу здоровью населения [1].

Интенсивность вредного воздействия транспортных средств определяется двумя ключевыми параметрами:

- структурой автопарка – соотношением легкового, грузового транспорта и автобусов;
- возрастом транспортных средств.

Эти показатели напрямую влияют на:

- объемы потребления горюче-смазочных материалов,
- количество образующихся отходов,
- интенсивность выбросов загрязняющих веществ.

Важно отметить, что:

- грузовики и автобусы расходуют в 3-5 раз больше топлива, чем легковые авто;
- транспортные средства старше 10 лет соответствуют стандарту Евро 0. Выбросы таких автомобилей превышают нормы Евро 3 в 5-10 раз [2].

Перед Россией стоит сложная дилемма:

- ограниченность бюджетных средств препятствует масштабному обновлению автопарка;
- устаревший транспорт продолжает загрязнять окружающую среду.

В современных условиях перехода к низкоуглеродной экономике особый интерес представляют два вида альтернативного топлива - природный газ и водород, каждый из которых обладает уникальными преимуществами и особенностями применения [12].

Природный газ в настоящее время является наиболее готовым к широкомасштабному внедрению альтернативным топливом.

Это обусловлено рядом ключевых факторов.

Во-первых, в России уже существует развитая инфраструктура газозаправочных станций, насчитывающая более 500 объектов по всей стране.

Во-вторых, государство активно поддерживает развитие газомоторного топлива через систему льгот и субсидий, включая налоговые преференции для производителей и владельцев газобаллонного оборудования. Важным экономическим преимуществом является значительное ценовое превосходство природного газа над бензином – стоимость километра пробега при использовании метана на 35-50% ниже. Кроме того, Россия обладает крупнейшими в мире запасами природного газа (около 20% мировых запасов), что обеспечивает надежную ресурсную базу для развития данного направления [3].

Водородные технологии представляют собой перспективное направление будущего, обладающее принципиально иными преимуществами. Главным экологическим преимуществом водорода является кардинальное снижение токсичности выхлопных газов – при его использовании в топливных элементах выбросы CO₂ полностью отсутствуют, а содержание других вредных веществ сокращается на 80-90%

С технической точки зрения, применение водорода позволяет повысить эффективность ДВС на 15-20% благодаря улучшенным характеристикам сгорания топливной смеси. В долгосрочной перспективе водородные технологии способны обеспечить радикальное улучшение экологических показателей транспортного сектора, что особенно актуально в условиях

ужесточения экологических норм и требований по снижению углеродного следа [19].

Таким образом, анализ показывает, что природный газ и водород представляют собой взаимодополняющие решения для разных временных горизонтов перехода на альтернативные виды топлива.

В ближайшей перспективе природный газ благодаря развитой инфраструктуре и экономической целесообразности является оптимальным решением, в то время как водородные технологии, несмотря на текущие ограничения, представляют собой стратегическое направление развития экологически чистого транспорта будущего.

Высокая себестоимость производства и хранения водорода делает его массовое применение экономически нецелесообразным. Однако перспективным направлением является использование водородных добавок к традиционным топливам [7, 8, 12].

1 Состояние вопроса

1.1 Использование природного газа в качестве моторного топлива на автомобильном транспорте

История применения газообразных топлив на транспорте имеет глубокие корни. Первые попытки использования газов в двигателях внутреннего сгорания относятся к началу XIX века. В 1801 году французский инженер Филипп Лебон предложил использовать светильный газ в качестве топлива, а уже в 1861 году его соотечественник Жан Ленуар создал первый практический газовый двигатель. Эти ранние разработки использовали газ при атмосферном давлении, что существенно ограничивало их эффективность [12].

«Значительный прогресс в газовых технологиях произошел в начале XX века. В 1915-1916 годах возобновились активные работы по применению не только светильного, но и природного газа на транспорте. После 1925 года начались систематические исследования по переводу автотранспорта на сжатый газ. Успешные испытания привели к тому, что в европейских странах развернулось крупносерийное производство газобаллонных автомобилей и строительство газонаполнительных станций, где газ сжимали до 20 МПа для заправки автомобильных баллонов» [5].

Особенно широкое распространение газомоторное топливо получило в 1930-40-х годах. В этот период сжатый газ использовался во многих европейских странах, включая Францию, Германию, Италию и скандинавские государства. Лидером стала Италия, где к 1940 году объем потребления природного газа автотранспортом достиг 50 млн м³. В послевоенный период итальянцы разработали инновационную систему сменных баллонов, что значительно упростило процесс заправки.

В России активное развитие газомоторного топлива началось в 1930-х годах, когда правительство, столкнувшись с дефицитом нефтепродуктов,

приняло решение о переводе части транспорта на газ. В 1936 году было издано специальное постановление, начался выпуск газобаллонной техники и строительство заправочных станций. Хотя Великая Отечественная война временно приостановила эти работы, в послевоенный период программа была возобновлена, к 1980-м годам в стране насчитывалось около 40 тысяч газобаллонных автомобилей.

«Новый этап развития наступил в 1980-е годы, когда вышло три постановления Совета Министров о массовом переводе транспорта на газ. За пять лет было построено около 500 автогазозаправочных станций, а число газобаллонных автомобилей достигло 0,5 млн. единиц. Координацией этих работ занимался специальный межведомственный совет под руководством В.С. Черномырдина» [2].

Современный этап развития газомоторного топлива в России начался после 1998 года, когда резко возрос спрос на сжатый природный газ. Сегодня, с учетом экологических требований и необходимости диверсификации энергоносителей, интерес к газовым технологиям в транспортном секторе продолжает расти, открывая новые перспективы для этого проверенного временем альтернативного топлива [18].

1.2. Преимущество сжатого природного газа над другими альтернативными видами топлива

С момента создания первого газового двигателя внутреннего сгорания в 1860 году мировой рынок газомоторного топлива демонстрирует устойчивый рост. Эта тенденция обусловлена способностью газового топлива одновременно решать две ключевые проблемы современного транспорта: экологическую нагрузку и дефицит традиционных нефтепродуктов.

«По данным исследований, переход на сжатый природный газ (СПГ) позволяет:

- сократить выбросы оксида углерода в 5-10 раз,
- уменьшить эмиссию окислов азота в 1,5-2 раза,
- снизить выбросы углеводородов в 2-3 раза по сравнению с бензиновыми аналогами» [7].

«Эти показатели полностью соответствуют строгим экологическим стандартам ЕЭК ООН, что делает КПГ наиболее экологичным среди всех углеводородных топлив» [5].

Преимущества безопасности КПГ:

- благодаря физическим свойствам метана (плотность ниже воздуха) при утечке газ быстро рассеивается, минимизируя риск возгорания;
- температура самовоспламенения КПГ (537°C) значительно выше, чем у бензина (246-280°C);
- в отличие от бензина, который скапливается внизу, образуя взрывоопасную смесь, метан не создает таких опасных концентраций.

Стоимость КПГ существенно ниже бензина, так как:

- не требует сложной переработки;
- цена определяется преимущественно затратами на добычу и транспортировку.

По данным НИИ автомобильного транспорта, использование КПГ увеличивает ресурс двигателя на 35-40%, снижает расход масла на 10-15%, продлевает срок службы свечей зажигания на 40% [10].

Перевод автомобиля на метан не требует кардинальной переделки двигателя.

Мировой опыт подтверждает эффективность и надежность газомоторных технологий.

Развитая инфраструктура газозаправочных станций в России облегчает переход на КПГ.

Таким образом, компримированный природный газ представляет собой оптимальное решение для современного транспорта, сочетая экологическую

безопасность, экономическую выгоду и техническую надежность. Накопленный мировой опыт и совершенствование технологий открывают новые перспективы для расширения применения КПГ в автомобильной отрасли.

1.3 Государственные меры стимулирования использования сжатого природного газа (СПГ) в транспортном секторе

«Во многих странах, где сжатый природный газ (СПГ) применяется в качестве моторного топлива, используются различные механизмы стимулирования, включающие как поощрительные, так и ограничительные меры» [2]. Эти меры могут реализовываться на национальном, региональном или муниципальном уровне и подразделяются на две основные категории: организационные и финансовые.

Организационные меры направлены на создание благоприятных условий для использования СПГ и включают законодательные ограничения для традиционных видов топлива, а также преференции для газомоторного транспорта.

Ограничения на использование дизельного и бензинового топлива:

- Бразилия, Египет, Южная Корея, Пакистан – запрет на эксплуатацию дизельных автомобилей малой и средней грузоподъемности;
- Италия, Япония, Пакистан, Дания – запрет на въезд бензиновых и дизельных автомобилей в экологические зоны городов и природоохранные территории [14, 15];
- Франция – муниципальный транспорт (автобусы, коммунальная техника) обязан использовать только СПГ;
- Италия – запрещено строительство новых АЗС без блоков заправки СПГ;

Льготы для газомоторного транспорта:

- «США – бюджетные организации при обновлении автопарка обязаны закупать автомобили на КППГ;
- Германия, Швеция – разрешен проезд по выделенным полосам для общественного транспорта;
- Германия – внеочередная посадка/высадка пассажиров в аэропортах для автомобилей на КППГ» [34];
- Франция, Италия, Греция, Китай – отмена ограничений на движение по экологическим критериям (четные/нечетные дни, время суток);
- Бангладеш – отсутствие возрастных ограничений для автомобилей на КППГ.

Административные преференции:

- Хорватия – освобождение от обязательного экологического тестирования;
- Италия, Франция, Иран – приоритет при получении муниципальных заказов для компаний, использующих КППГ.

Выводы по разделу.

Приведенные меры демонстрируют, что во многих странах государство активно стимулирует переход на КППГ через законодательные ограничения для традиционного топлива и предоставление льгот для газомоторного транспорта. Это способствует не только снижению вредных выбросов, но и ускоренному развитию инфраструктуры. В России подобные меры могли бы значительно повысить привлекательность КППГ для бизнеса и частных автовладельцев.

Использование КППГ в транспортном секторе является экономически выгодным и экологически обоснованным решением. Государственная поддержка ускоряет переход на газомоторное топливо, однако для массового внедрения требуется дальнейшее развитие инфраструктуры.

2 Применение водорода для автомобильного транспорта

Водород рассматривается как перспективное топливо для автомобильного транспорта, в том числе в России. Его применение в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) способно повысить КПД, улучшить экономичность и значительно снизить вредные выбросы.

Экспериментальные данные подтверждают преимущества водородных добавок:

- расширение диапазона воспламенения,
- стабилизацию процесса горения,
- эффективность работы во влажной среде.

2.1 История и развитие водородных технологий в СССР и России

«Пионерские работы по использованию водорода в ДВС начались еще в 1941 году. В 1970-х годах советские научные центры, включая НАМИ, Институт проблем машиностроения АН УССР и Сектор механики неоднородных сред АН СССР, активно исследовали водородные топливные смеси.

Под руководством профессора И.Л. Варшавского были созданы автомобили и погрузчики, работающие на бензоводородных смесях с металлогидридными системами хранения. В НАМИ под руководством Е.В. Шатрова разработали бензоводородный микроавтобус РАФ-22034 (рисунок 1), оснащенный экспериментальной системой питания, успешно прошедшей испытания» [3].

Однако использование чистого водорода выявило ряд проблем: снижение мощности двигателя, склонность к детонации при высоких нагрузках и необходимость модернизации конструкции ДВС.

Главными барьерами для массового внедрения водорода остаются:

- сложность производства, хранения и транспортировки – водород требует либо высокого давления, либо криогенных температур, что увеличивает стоимость и риски;
- высокая себестоимость – несмотря на эффективность паровой конверсии метана (основного метода получения H_2), процесс остается энергоемким и не всегда экологичным.



Рисунок 1 – Бензоводородный микроавтобус РАФ-22034 разработки НАМИ

Полный переход на водород пока экономически нецелесообразен, но его добавление к традиционным топливам открывает новые возможности. Например, смесь сжатого природного газа (СПГ) и водорода позволяет снизить токсичность выхлопа без радикального изменения конструкции двигателя.

Хранение водорода на борту транспортных средств остается сложной задачей из-за громоздкости и взрывоопасности систем.

В качестве решения рассматриваются два подхода:

- бортовая конверсия – получение водорода непосредственно в автомобиле;
- заправочная инфраструктура – производство и подача H_2 на специализированных станциях.

2.2 Современное состояние водородной индустрии: производство и перспективы использования

Мировая водородная промышленность достигла значительных масштабов – ежегодный объем производства составляет 50 млн. тонн с устойчивым годовым ростом на 10%. Примечательно, что лишь 62% от общего объема выпускается целенаправленно, тогда как 38% образуется как побочный продукт в различных отраслях промышленности, включая:

- нефтепереработку,
- коксохимическое производство,
- электрохимические процессы (сопутствующее производство при получении хлора, хлоратов и другой продукции).

Особого внимания заслуживает хлорное производство, где при мировом выпуске 25 млн. тонн хлора ежегодно попутно генерируется около 0,7 млн. тонн водорода.

Однако значительная часть этого ценного ресурса:

- частично используется в промышленных целях,
- частично сжигается в котельных установках,
- в некоторых случаях просто выбрасывается в атмосферу.

Активно рассматриваются варианты более рационального применения побочного водорода:

- в традиционных химических процессах;

- в качестве альтернативного энергоносителя для замещения: природного газа, нефтяных фракций.

Геологические исследования выявили потенциально перспективные месторождения в зоне Байкальского рифтогенеза (Тункинская впадина), где на глубинах 4-6 км залегают водородонасыщенные породы, обнаружены аномалии электропроводности. Планируется проведение разведочного бурения для оценки запасов

Основными направлениями использования водорода (95% общего объема) являются:

- химическая промышленность: производство аммиака (минеральные удобрения), органический синтез (включая производство метанола);
- нефтепереработка: гидрокрекинг, гидроочистка, повышение качества нефтепродуктов.

Применение водорода в нефтепереработке позволяет:

- увеличить глубину переработки сырья
- повысить теплотворную способность конечных продуктов
- снизить количество вредных выбросов при сжигании топлива

Таким образом, водородная промышленность представляет собой динамично развивающуюся отрасль с широкими перспективами как в традиционных областях применения, так и в новых энергетических решениях.

На сегодня паровая конверсия метана (ПКМ) доминирует в производстве водорода, обеспечивая около 85% мирового объема благодаря высокой эффективности и отработанной логистике. Однако будущее – за «зеленым» водородом, получаемым с помощью возобновляемых источников энергии.

В российских условиях текущая себестоимость производства водорода методом ПКМ варьируется в пределах 60-200 рублей за килограмм. Однако технологический прогресс позволяет прогнозировать снижение этой

величины до 40-100 рублей с учетом логистических расходов и хранения, что существенно повысит конкурентоспособность водородного топлива.

«Ключевые этапы производства водорода:

- первичная реакция: при температуре 750-850°C в трубчатых реакторах с никель-корундовыми катализаторами происходит преобразование метана и водяного пара в синтез-газ ($\text{CO} + 3\text{H}_2$);
- реакция сдвига: при 200-250°C оксид углерода дополнительно реагирует с водяным паром, образуя диоксид углерода и дополнительный водород» [24].

Для поддержания эндотермического процесса требуется сжигание значительной части исходного газа (до 50%), что стимулирует поиск альтернативных источников энергии для нагрева.

Современные исследования сосредоточены на:

- интеграции высокотемпературных гелиевых реакторов (ВТГР) для теплоснабжения процесса;
- развитию парокислородной конверсии, где добавление кислорода: повышает стоимость установки на 5-10%, позволяет использовать более дешевые шахтные реакторы вместо трубчатых, обеспечивает тепловую нейтральность процесса.

Технологический процесс производства метано-водородных смесей включает:

- очистку природного газа от сернистых соединений,
- смешивание с перегретым паром (450°C),
- дополнительный нагрев до 680°C,
- адиабатическую конверсию в реакторе.

«Ключевые параметры:

- производительность: 1000 м³/ч природного газа → 1792 м³/ч метано-водородной смеси;
- температурный диапазон: 637-659°C (зависит от катализатора);
- концентрация водорода: регулируемая 0-48%» [29].

Использование метано-водородных смесей с содержанием водорода до 30% демонстрирует:

- улучшенные характеристики горения;
- повышенную устойчивость к переменным условиям;
- эффективность работы при высоком содержании паров воды (20-30%).

Перспективы развития:

- природный газ сохраняет лидирующие позиции в энергетическом балансе;
- водородная энергетика - стратегическое направление развития.

Российская технология адиабатической конверсии предлагает:

- упрощенную схему производства,
- отсутствие необходимости в кислороде,
- более низкие рабочие температуры (до 680°C),
- возможность интеграции на АЗС.

2.3 Добавки водорода в компримированный природный газ

«Компримированный природный газ (КПГ), состоящий преимущественно из метана (CH_4), широко используется в качестве альтернативного топлива для ДВС благодаря своей экологичности и экономичности» [6]. Однако его применение имеет ряд ограничений, связанных с относительно низкой скоростью сгорания и повышенным уровнем выбросов несгоревших углеводородов. Одним из перспективных направлений модернизации КПГ является добавление в его состав водорода (H_2), что позволяет улучшить процесс сгорания и снизить вредные выбросы.

Физико-химические аспекты смеси КПГ- H_2 :

- скорость горения: водород обладает высокой скоростью горения (до 3,5 м/с), что в 6–7 раз выше, чем у метана. Добавление даже 10-20% H_2 в КПГ ускоряет процесс сгорания топливной смеси, что

приводит к более полному сгоранию и снижению концентрации СН и СО в выхлопных газах;

- октановое число: водород имеет высокое октановое число (более 130), что позволяет предотвратить детонацию при работе двигателя на высоких нагрузках;
- диапазон воспламеняемости: широкий диапазон воспламеняемости водорода (4-75% в воздухе) делает смесь более устойчивой к колебаниям состава топливовоздушной смеси.

Исследования показывают, что добавление от 5 до 30% водорода к КППГ является наиболее эффективным с точки зрения улучшения характеристик двигателя:

- 5–15% H_2 – улучшение горения без необходимости существенной модификации двигателя;
- 20–30% H_2 – требует корректировки системы зажигания и впрыска, но обеспечивает значительный прирост мощности и снижение выбросов.

Мощность и КПД:

- добавка 20% H_2 увеличивает мощность двигателя на 10-15% за счет более быстрого и полного сгорания смеси;
- КПД двигателя возрастает на 5-8% благодаря снижению тепловых потерь и уменьшению времени сгорания.

Рассмотрим токсичность выхлопных газов при добавлении 20% водорода в смесь (таблица 1).

Таблица 1 – Токсичность выхлопных газов при добавлении 20% водорода в смесь

Компонент	Изменение при добавке 20% H_2	Причина
СО	уменьшение на 30–40%	Более полное окисление
NO_x	увеличение на 10–15%	Рост температуры в камере сгорания
СН	уменьшение на 25–35%	Улучшенное горение
CO_2	уменьшение на 15–20%	Замещение углерода водородом

Проблемами и ограничениями являются:

- рост температуры сгорания и, как, следствие, увеличение выбросов NO_x ;
- риск обратной вспышки из-за высокой диффузии водорода;
- необходимость модификации топливной системы (усиленные форсунки, датчики).

Технические решения для применения H_2 -КПГ смесей:

- прямой впрыск водорода – позволяет избежать обратной вспышки;
- послойное смесеобразование – оптимизирует процесс горения;
- ионизационные свечи – обеспечивают стабильное воспламенение;
- оптимизация угла опережения зажигания – компенсирует высокую скорость горения;
- жаропрочные сплавы для деталей двигателя – для предотвращения водородной хрупкости;
- керамические покрытия – защита от высоких температур.

Выполним сравнение стоимости эксплуатации КПГ и H_2 -КПГ смеси (таблица 2).

Таблица 2 – Сравнение стоимости эксплуатации КПГ и H_2 -КПГ смеси

Параметр	Тип топлива	
	КПГ	КПГ + 20% H_2
Стоимость топлива, р./м ³	26,57	60
Расход топлива, м ³ /100 км	10	8,5
Экономия	–	10–15%

Перспективы внедрения:

- городской транспорт – автобусы, коммунальная техника,
- грузовые перевозки – при развитии водородной инфраструктуры.

Выводы по разделу.

СССР и Россия имеют значительный научно-технический задел в области водородных технологий, особенно в сфере космической и энергетической отраслей. Однако их внедрение в автомобильный транспорт

долгое время оставалось ограниченным из-за экономических и технологических барьеров.

В последние годы интерес к водороду как экологичному топливу резко возрос, но его массовое применение сдерживается высокой стоимостью производства, хранения и заправочной инфраструктуры.

Перспективными направлениями являются развитие «зелёного» водорода (на основе возобновляемых источников энергии) и создание водородных транспортных коридоров.

Использование водородно-метановых смесей (HCNG) позволяет снизить выбросы CO₂ и улучшить КПД двигателей, но требует модификации ДВС и систем топливоподачи.

Технология рассматривается как промежуточное решение на пути к полностью водородной энергетике.

3 Водородонасыщение природного газа на автомобильной газонаполнительной компрессионной станции

3.1 Автомобильные газонаполнительные компрессорные станции

«Автомобильные газонаполнительные компрессорные станции (АГНКС) – это специализированные объекты, предназначенные для заправки транспортных средств компримированным (сжатым) природным газом» [8].

Основные функции АГНКС:

- приём природного газа из магистральных газопроводов или других источников;
- очистка и осушка газа для удаления примесей и влаги;
- компримирование (сжатие) газа до давления 200–250 бар (в некоторых случаях до 300 бар);
- хранение сжатого газа в буферных ёмкостях (аккумуляторах);
- заправка автомобилей через специальные колонки (раздаточные устройства).

АГНКС сегодня – ключевое звено городской экосистемы. Они не только позволяют существенно сократить затраты на дорогое нефтяное топливо, но и вносят весомый вклад в защиту атмосферы. Перевод транспорта на компримированный природный газ (КПГ) – это действенная мера по снижению вредных выбросов в городах.

При соблюдении всех технологических норм производства и заправки КПГ АГНКС не оказывают вредного влияния ни на людей, ни на окружающую среду.

Концентрация углеводородов не превышает установленных пределов:

- 300 мг/м³ – в рабочей зоне,
- 50 мг/м³ – в охранной территории.

Риски возникают лишь в случае аварий или нештатных ситуаций, но и здесь предусмотрены чёткие меры – все возможные инциденты оперативно

устраняются в рамках заранее разработанных планов локализации и ликвидации.

Современные автомобильные газонаполнительные компрессорные станции (АГНКС) функционируют в круглосуточном автоматизированном режиме, что обеспечивает непрерывность и высокую производительность процесса заправки транспортных средств. Газораздаточные колонки оснащены прецизионными датчиками и системами учета, позволяющими с высокой точностью фиксировать объем или массу отпускаемого компримированного природного газа (КПГ), что соответствует требованиям нормативных документов в области коммерческого учета топлива.

В отличие от традиционных автозаправочных станций, где осуществляется лишь хранение и реализация готового моторного топлива, АГНКС представляют собой комплексные технологические объекты, осуществляющие полный цикл подготовки природного газа перед его использованием в качестве моторного топлива.

Данный процесс включает следующие ключевые технологические этапы:

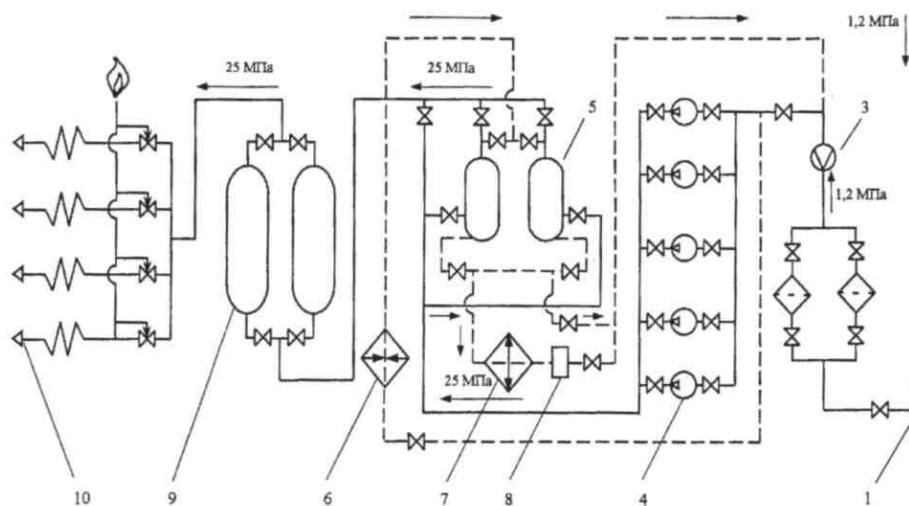
- «очистка газа – поступающий по газопроводу природный газ проходит многоступенчатую очистку в сепараторах и фильтрах тонкой очистки, где происходит удаление капельной жидкости, механических примесей и аэрозольных включений. Это обеспечивает соответствие качества газа требованиям ГОСТ Р 55247-2012 и другим нормативным документам» [10];
- коммерческий учет газа – на данном этапе осуществляется точное измерение объема поступающего газа с помощью корректоров объема или современных ультразвуковых расходомеров, что гарантирует достоверность коммерческих расчетов с поставщиками.
- компрессия и промежуточное охлаждение – газ подвергается многоступенчатому сжатию в поршневых или винтовых

компрессорах до рабочего давления 25 МПа. После каждой ступени сжатия газ проходит принудительное охлаждение в теплообменниках, что предотвращает его перегрев и обеспечивает стабильность термодинамических параметров;

- осушка газа – для удаления остаточной влаги используется адсорбционная осушка в блоках с молекулярными ситами или другими сорбентами. Это исключает риск гидратообразования и коррозии элементов топливной системы транспортных средств.
- «хранение и распределение – сжатый и осушенный газ аккумулируется в накопительных резервуарах под давлением 25 МПа, откуда подается на газораздаточные колонки, где давление снижается до 20 МПа – оптимального значения для заправки автомобильных баллонов» [10].

Принципиальная схема АГНКС.

На рисунке 2 представлена принципиальная технологическая схема автомобильной газонаполнительной компрессорной станции, наглядно демонстрирующая взаимосвязь всех ключевых узлов и агрегатов.



- 1 – газопровод; 2 – фильтр; 3 – расходомер; 4 – компрессор; 5 – адсорбер;
 6 – электронагреватель; 7 – холодильник; 8 – маслоотделитель; 9 – аккумулятор газа;
 10 – раздаточный шланг

Рисунок 2 – Схема АГНКС

Природный газ, поступающий из магистрального газопровода (1), первоначально проходит стадию механической очистки. Для этого используется блок фильтрации, состоящий из четырех последовательно соединенных сетчатых фильтров (2) с ячейкой 15 мкм. Такая конструкция обеспечивает эффективное удаление твердых частиц и аэрозольных включений, что соответствует требованиям ГОСТ Р 55889-2013 по качеству газомоторного топлива.

После очистки осуществляется коммерческий учет газа с помощью турбинного или ультразвукового расходомера (3), обеспечивающего погрешность измерений не более $\pm 1,0\%$.

«Далее газ поступает в блок компрессорных установок, где происходит его последовательное сжатие до рабочего давления 25 МПа.

Технологический процесс осуществляется с использованием четырехцилиндрового поршневого компрессора (4) с промежуточным охлаждением; последовательного повышения давления на каждой ступени:

- I ступень: $1,0 \rightarrow 2,5$ МПа,
- II ступень: $2,5 \rightarrow 7,5$ МПа,
- III ступень: $7,5 \rightarrow 13$ МПа,
- IV ступень: $13 \rightarrow 25$ МПа» [34].

Между ступенями сжатия газ проходит принудительное охлаждение в кожухотрубных теплообменниках, что позволяет поддерживать температуру на выходе не выше 45°C (согласно СП 156.13130.2014).

Для обеспечения требуемых показателей по влажности (не более $0,05 \text{ г/м}^3$ по ГОСТ Р 52087-2003) сжатый газ направляется в блок осушки, включающий два параллельных адсорбера (5), заполненных молекулярными ситами, систему регенерации с электронагревателем (6), холодильник-конденсатор (7), масловлагоотделитель (8).

Процесс осуществляется в циклическом режиме:

- в одном адсорбере происходит осушка технологического газа,
- второй адсорбер находится в стадии регенерации,

- регенерация выполняется нагретым до 250-300°C газом,
- отработанный регенерационный газ после охлаждения и сепарации возвращается во всасывающую линию компрессора.

Осушенный газ поступает в блок аккумуляторов:

- количество резервуаров: 4-6 единиц (в зависимости от производительности АГНКС);
- рабочий объем каждого: 9 м³;
- рабочее давление: 25 МПа;
- материал: сталь 12Х18Н10Т по ГОСТ 5632-2014.

Аккумуляторы выполняют важные функции:

- сглаживание пиковых нагрузок,
- обеспечение стабильности давления в системе,
- создание резерва для бесперебойной заправки.

5. Процесс заправки транспортных средств

Заправочный процесс осуществляется через газораздаточные колонки:

- использование армированного шланга (10) с быстросъемным соединением;
- герметизация с помощью конической уплотнительной гайки (усилие затяжки 50-70 Н·м);
- визуальный мониторинг по манометру;
- автоматическое отключение при достижении 20 МПа;
- фиксация объема отпущенного топлива.

Система безопасности:

- аварийные отсечные клапаны,
- датчики утечки газа,
- заземляющий контур.

Данная технологическая схема обеспечивает полное соответствие требованиям:

- Технического регламента Таможенного союза ТР ТС 016/2011,
- Правил промышленной безопасности ОПО,

- Экологических нормативов ГОСТ Р 56870-2016.

Линия всасывания компрессора.

Природный газ поступает на АГНКС из внешнего газопровода с рабочим давлением 0,3-1,2 МПа (3-12 кгс/см²).

На входной линии последовательно установлены:

- запорный кран – для полного отключения станции;
- фильтр грубой очистки обеспечивает сепарацию капельной влаги за счет инерционного отделения. Оснащен сменным фильтрующим элементом (тонкость фильтрации 15-25 мкм). Имеет систему периодического слива конденсата;
- предохранительный клапан – настроен на срабатывание при 0,017 МПа (0,17 кгс/см²).

Далее очищенный газ проходит через измерительный комплекс, включающий:

- сужающее устройство (трубка Вентури) по ГОСТ 8.586.1-2005,
- датчики абсолютного давления класса точности 0,5,
- термопреобразователь сопротивления,
- электромагнитный отсечной клапан.

Перед подачей в компрессор газ проходит сложную систему подготовки:

Система редуцирования:

- регулятор давления РД1 (настройка 0,015 МПа);
- вихревая труба Ранка-Хильша разделяет поток на холодный (минус 30°C) и горячий (50°C) с эффективностью разделения до 85%;
- система осушки: снегоотделитель с расширительной камерой, трубчатый влагоотделитель, система рециркуляции горячего потока для таяния снега;
- теплообменное оборудование: регенеративный теплообменник, подогреватель линии регенерации.

На линии всасывания установлены:

- манометры показывающие класса точности 1,5,
- датчики давления с выходом 4-20 мА,
- система автоматического регулирования расхода.

При падении входного давления ниже 0,3 МПа автоматически включается резервный регулятор расхода.

Температурный режим контролируется в трех точках:

- на входе вихревой трубы,
- после снегоотделителя,
- на всасе компрессора.

Система регенерации использует 12-15% горячего потока для таяния снега.

Данная схема обеспечивает:

- снижение точки росы до минус 40°C;
- поддержание стабильного давления на всасе;
- защиту компрессора от гидроударов;
- соответствие требованиям РД 153-39.4-079-01.

Все технологические параметры регистрируются системой телеметрии и архивируются в соответствии с требованиями промышленной безопасности.

На линии всасывания используются контрольно-измерительные приборы различного типа.

Манометры контроля давления:

- на входе АГНКС (диапазон 0-1,6 МПа)
- перед редуктором-регулятором (класс точности 1,5)
- перед вихревой трубой (с термокомпенсацией)
- на всасе компрессора (с преобразователем 4-20 мА)

Термометрическое оборудование:

- датчик температуры после вихревой трубы (тип ТСМ)

- датчик температуры на всасе компрессора (диапазон $-50...+100^{\circ}\text{C}$)

Запорно-регулирующая арматура:

- ручные краны: отбора проб (с нержавеющей штуцером), аварийного отключения (дублирующий электромагнитный клапан), пуска газа (с визуальным индикатором положения);
- продувочный (DN20, с заглушкой);
- конденсатосборника (с фильтром-сепаратором).

Автоматические клапаны:

- электромагнитный отсечной (время срабатывания <1 с),
- сбросной аварийный (с выбросом в факельную систему),
- предохранительный (настройка 0,017 МПа).

Фильтрующие элементы:

- газовый фильтр тонкой очистки (степень 15 мкм);
- фильтр-влагоотделитель с автоматическим сливом.

Измерительный комплекс:

- ультразвуковой расходомер ($\pm 0,5\%$);
- корректор объема (с термокомпенсацией).

Система подготовки газа:

- вихревая труба (эффективность охлаждения 30°C);
- снегоотделитель с расширительной камерой;
- трубчатый влагоотделитель (коалесцентный тип);
- регулятор давления «после себя»

Системы безопасности:

- дублирующие системы отключения: 2-х позиционный электромагнитный клапан, ручной дублирующий кран, контроль параметров;
- датчик перепада давления на фильтрах;
- сигнализатор обледенения;
- реле минимального давления.

Специальные устройства:

- редукционно-охладительный блок,
- двухступенчатый регулятор давления,
- вихревой охладитель с КПД 65%,
- регенеративный теплообменник.

Система утилизации конденсата:

- герметичный сборник с поплавковым клапаном,
- линия рециркуляции в компрессор.

Рабочие параметры:

- давление в линии всаса: $0,015 \pm 0,002$ МПа,
- температурный диапазон: от минус 30 до плюс 45°C,
- максимальная производительность: 1200 м³/ч.

Требования по ТО:

- замена фильтрующих элементов – каждые 2500 часов,
- поверка КИП – ежегодно,
- испытание предохранительных клапанов – раз в 6 месяцев.

Данная конфигурация соответствует:

- техническому регламенту ТР ТС 032/2013,
- нормам ПБ 03-585-03,
- стандартам API 618 (для компрессорных систем)

Система компримирования природного газа.

Процесс сжатия осуществляется в пять технологических ступеней с промежуточным охлаждением:

- I ступень: $0,15 \rightarrow 0,45$ МПа (t нагнетания 120-140°C),
- II ступень: $0,45 \rightarrow 1,35$ МПа (t нагнетания 130-150°C),
- III ступень: $1,35 \rightarrow 4,05$ МПа (t нагнетания 140-160°C),
- IV ступень: $4,05 \rightarrow 12,15$ МПа (t нагнетания 150-170°C),
- V ступень: $12,15 \rightarrow 25,0$ МПа (t нагнетания 160-180°C).

Система промежуточного охлаждения:

- кожухотрубные теплообменники (тип ТН),
- охлаждающая среда: вода/антифриз (t входа 15°C , t выхода 45°C),
- тепловая нагрузка: 250-350 кВт на ступень.

На блоке датчиков установлены контрольно-измерительные приборы.

Манометрическое оборудование:

- всасывающая линия (диапазон 0-0,6 МПа);
- ступени сжатия (класс точности 1,0): I ступень: 0-1,0 МПа;
- II ступень: 0-2,0 МПа, III ступень: 0-5,0 МПа, IV ступень: 0-15,0 МПа, V ступень: 0-30,0 МПа;
- раздаточный коллектор (с преобразователем 4-20 мА)

Термометрическое оборудование:

- газовые термометры сопротивления (Pt100) после каждой ступени сжатия, на выходе конечного холодильника;
- масляные термометры: картер компрессора ($0-150^{\circ}\text{C}$), система охлаждения ($0-100^{\circ}\text{C}$);
- мониторинг вспомогательных систем: давление в системе смазки (0-1,0 МПа), давление охлаждающей жидкости (0-0,6 МПа).

Перепад давления на масляном фильтре (0-0,15 МПа).

Системы безопасности и управления:

- предохранительные устройства: пружинные клапаны (настроены на 110% рабочего давления): I ступень 0,5 МПа, II ступень 1,5 МПа, III ступень 4,5 МПа, IV ступень 13,5 МПа, V ступень 27,5 МПа.

Аварийные системы:

- байпасная линия с электромагнитным клапаном,
- дренажный коллектор с сепаратором,
- система аварийного стравливания,
- запорная арматура: шаровые краны с электроприводом (DN80), двойные отсечные устройства на всасе/нагнетании, ручные дублирующие краны.

«После компрессора газ высокого давления (до 250 кгс/см²) поступает в систему осушки газа, состоящую из двух последовательно включенных влагоотделителей и далее через кран в линию заправки. Отделённая жидкость и снег, скопившиеся в нижних частях корпусов снегоотделителя и влагоотделителей, после подогрева, периодически удаляются через ручные краны по линиям дренажа в ёмкость для сбора конденсата.

В случае недостаточной степени осушки газа в основной системе осушки (при высокой температуре газа на входе АГНКС), АГНКС имеет систему дополнительной осушки.

Система дополнительной осушки состоит из двух пар осушителей с силикагелем, работающих поочередно (пара на осушку вторая на регенерации). Газ после теплообменника третьей ступени компрессора поступает в осушитель, проходит через слой силикагеля, где из него адсорбируется оставшаяся влага» [33].

«Регенерация силикагеля происходит за счёт продувки осушителя нагретым до 130-140°С газом после второй ступени компрессора. В процессе регенерации осушителей, насыщенный влагой газ из линии нагнетания направляется в основную систему осушки и далее через кран, линию заправки, измеритель, распределитель клапанный, дроссель, клапан обратный, кран, вход АГНКС, кран, фильтр ФС, измеритель, кран электромагнитный, кран, регулятор, вихревая труба, снегоотделитель, трубный пучок, и вновь на вход компрессора. Во время регенерации заправка не производится.

Кроме того, предусмотрена периодическая оттайка трубных пучков влагоотделителей, по мере их обмерзания, путём закольцовывания компрессора через распределительный клапан» [30].

«На линии системы осушки установлены:

- датчик температуры, для контроля температуры газа на выходе из компрессора;
- влагоотделитель;

- датчик температуры, для контроля точки росы (степени осушки) газа идущего на заправку;
- клапан распределительный с электроклапаном, для разгрузки компрессора при пуске и байпасирования его в режиме холостого хода, а также в режиме оттайки трубных пучков влагоотделителей;
- клапан обратный, для предотвращения сброса давления газа из линии заправки во время оттайки трубных пучков влагоотделителей и промежуточных пусков компрессора;
- кран ручной, для отключения линии заправки» [13].

«На линии системы дополнительной осушки обычно устанавливаются:

- ручные краны для отключения системы дополнительной осушки;
- краны ручные для переключения режимов работы осушителей системы (осушка - регенерация);
- краны ручные для отключения манометров;
- краны ручные для сброса газа и продувки системы дополнительной осушки;
- манометры, предназначенные для контроля давления газа в системе дополнительной осушки» [11].

«На линиях дренажа установлены:

- кран ручной, для продувки отделителя снега.
- клапан обратный, для защиты линии всоса от скачков давления в ёмкости сбора конденсата;
- кран ручной, для отключения ёмкости сбора конденсата во время профилактических работ;
- клапан обратный, для пропуска продувочного газа на всос компрессора;
- кран ручной, для продувки влагоотделителя;

- клапан обратный, для предотвращения обратного потока, со встроенным дросселем, для ограничения расхода при продувкекран ручной, для продувки влагоотделителя;
- клапан обратный, для предотвращения обратного потока, со встроенным дросселем, для ограничения расхода при продувке;
- клапан обратный, для предотвращения обратного потока;
- сборник конденсата, для сбора конденсата при продувке оборудования» [32].

«На ёмкости сбора конденсата установлены:

- манометр, предназначенный для контроля давления газа в ёмкости сбора конденсата;
- клапан предохранительный, для ограничения давления газа в ёмкости сбора конденсата» [28].

Линия заправки автомобилей сжатым газом.

«Линия заправки состоит из аккумулятора газа, узла измерения расхода газа и запорно-регулирующей арматуры. Кроме того, линия заправки соединена линией сброса давления с входным трубопроводом АГНКС.

На линии заправки установлены:

- манометр с датчиком давления, предназначенный для контроля давления газа в линии нагнетания;
- редуктор-регулятор, для ограничения давления заправки;
- манометр с датчиком давления, предназначенный для контроля давления газа, идущего на заправку;
- клапан предохранительный, для защиты линии заправки от повышения давления газа в случае отказа регулятора;
- ручной кран, для продувки линии заправки;
- ручной кран, для отключения аккумулятора газа;
- клапан распределительный с электроклапаном, для отключения аккумулятора газа;

- манометр с датчиком давления для контроля давления в аккумуляторе газа;
- измеритель расхода газа, для измерения расхода газа, идущего на заправку;
- ручной кран для отключения линии заправки;
- клапан распределительный с электроклапаном, для отключения линии заправки;
- ручной кран для отбора проб;
- заправочная колонка с двумя заправочными шлангами;
- ручной кран типа, для сброса газа из заправочной колонки на вход АГНКС» [14].

Линия сброса давления.

«Для разгрузки компрессора и исключения выбросов газа в атмосферу при разгрузке компрессора линия заправки соединена с входным трубопроводом АГНКС линией сброса давления.

На линии сброса давления установлены:

- клапан распределительный с электроклапаном, для сброса давления из линии заправки по команде автоматики;
- клапан обратный, для предотвращения обратного потока, со встроенным дросселем, для ограничения расхода при сбросе давления;
- ручной кран, для отключения линии сброса» [17].

Аккумулятор газа (рисунок 3).

«Аккумулятор газа предназначен для накопления запаса газа при работе компрессора во время отсутствия автомобилей, хранения запаса газа и обеспечения ускоренной заправки автомобиля за счёт накопленного объёма газа.

Аккумулятор представляет собой батарею из двадцати соединённых между собой баллонов ёмкостью по 50 литров каждый размещённых на единой раме. Аккумулятор трубопроводом соединяется с технологическим

блок-боксом. Для аварийного сброса газа на аккумуляторе установлена отдельная свеча с краном. Для контроля давления в аккумуляторе газа устанавливают манометр» [16].



Рисунок 3 – Аккумулятор газа

Система автоматического управления АГНКС.

«Система автоматики компрессора обеспечивает автоматическую защиту с выдачей обобщённого светового сигнала «Авария» и расшифровывающий световой сигнал при:

- давлении газа избыточном на всасывающей линии менее 0,005 МПа (0,05 кгс/см²) и более 0,015 МПа (0,15 кгс/см²);
- давлении газа избыточном на нагнетании 1 ступени более 0,42 МПа (4,2 кгс/см²), 2 ступени более 1,45 МПа (14,5 кгс/см²), 3 ступени более 4,6 МПа (46 кгс/см²), 4 ступени более 12,5 МПа (125 кгс/см²), 5 ступени более 25 МПа (250 кгс/см²);
- расходе охлаждающей жидкости менее 0,55 дм³/с (2,0 м³/час);

- давлении масла избыточном в системе смазки менее 0,18 МПа (1,8 кгс/см²);
- температуре газа после 5 ступени сжатия более 473 К (200°С)» [21].

«Обеспечивает блокировку в случаях:

- невозможности пуска компрессора при расходе охлаждающей жидкости ниже нормы;
- отключения защиты по давлению масла на время пуска компрессора;
- невозможности пуска компрессора без устранения причины, вызвавшей аварийную остановку» [23].

«Общестанционная система автоматики обеспечивает:

- включение аварийной принудительной системы вентиляции отсеков и звуковой сигнализации по команде от системы контроля загазованности при концентрации природного газа в воздухе, равной 10% от НПВ;
- останов электродвигателя и компрессорной установки, подачу сигнала «Аварийная загазованность» при концентрации газа 20% от НПВ;
- включение аварийного освещения при отключении основного электропитания, если было включено основное освещение;
- автоматическое включение аварийного электропитания систем пожарной сигнализации от резервного источника постоянного тока 24 В (аккумуляторная батарея);
- автоматическое прекращение отпуска газа при аварийной загазованности помещений или возникновении пожара;
- отключение аварийной системы принудительной вентиляции при пожаре по сигналу «Пожар» от системы пожарной сигнализации;
- останов электродвигателя и компрессорной установки, отключение АГНКС от подводящего газопровода и стравливание газа из контура станции и аккумулятора газа через электромагнитные

краны по сигналам аварийный останов АГНКС, Аварийная загазованность, Пожар;

- исключение запуска приводного электродвигателя при отсутствии наддува отсека двигателя» [5].

Система охлаждения компрессора.

«Система охлаждения компрессора состоит из двух водяных радиаторов применяемых на тракторах, циркуляционного насоса, вентилятора обдува с электроприводом и трубопроводов, соединяющих компрессор с радиатором.

Охлаждающая жидкость из радиатора, через сужающее устройство, подводится к холодильнику I - II ступени и к напорному коллектору компрессора. Из коллектора охлаждающая жидкость поступает в холодильники III - IV и V ступеней, водяные полости цилиндров, головки цилиндров. Из водяных рубашек головок и холодильника V ступени охлаждающая жидкость по трубопроводам поступает в сливную воронку. Из сливной воронки по трубопроводу охлаждающая жидкость подаётся к циркуляционному насосу. Устройство устанавливается в системе охлаждения и служит для создания перепада давлений с целью контроля расхода охлаждающей жидкости, поступающей на охлаждение компрессора.

Разность давлений перед диафрагмой устройства сужающего и за ней находится в прямой зависимости от расхода жидкости через диафрагму. Контроль за величиной перепада давлений осуществляется датчиком перепада давлений. При понижении расхода жидкости датчик срабатывает и на щите автоматики загорается сигнал Авария» [26].

Дополнительные системы, использующиеся на АГНКС.

«К дополнительным системам (комплексам) относятся:

- система отопления,
- комплекс электрооборудования,
- блок боксы оператора,
- система звукового и визуального оповещения.

Распределительная колонка.

Колонка представляет собой шкаф, в котором смонтированы устройства и узлы, необходимые для учёта газа, фильтр, трубопроводы, индикатор давления (манометр)» [22].

Внешний вид газонаполнительной колонки, применяющие на АГНКС продемонстрирован на рисунке 4.

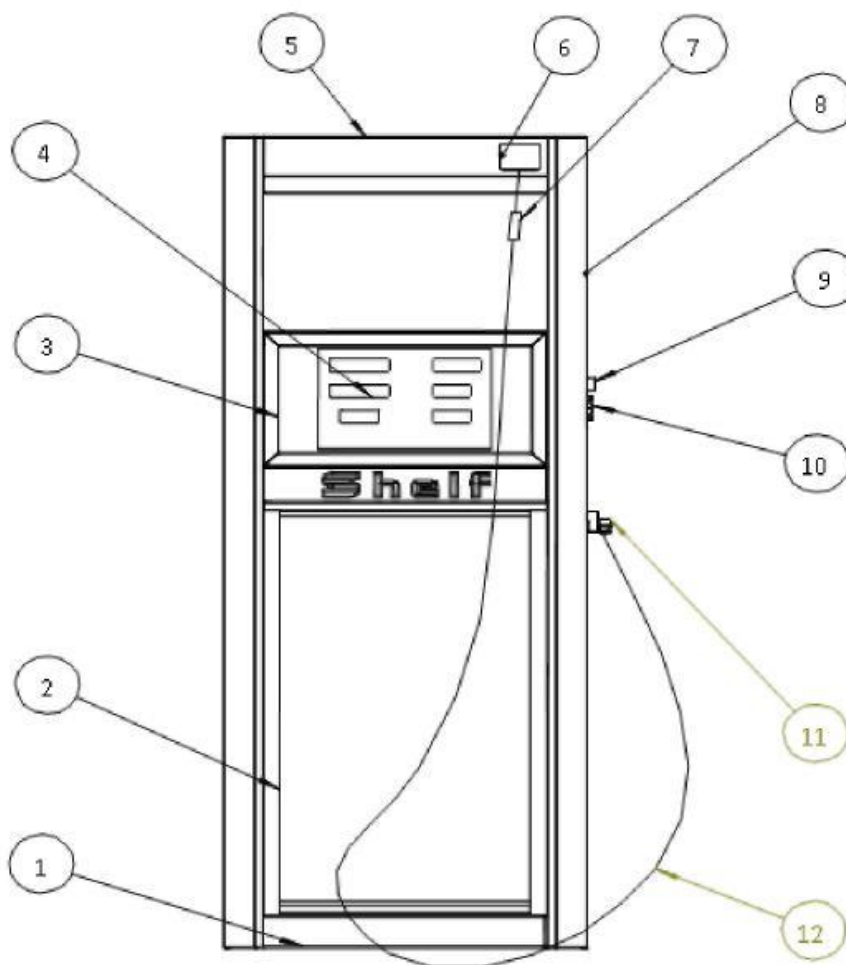


Рисунок 4 – Внешний вид газонаполнительной колонки

«Рама колонки 1, с двух сторон закрыта несъёмными панелями 8 , а спереди и сзади рама оснащается разъёмными панелями 2. Также через окошко 3 имеется возможность удобного доступа к составляющим колонки. Клавиатура 10 управления и кнопка Стоп 9 расположены на правой боковой панели корпуса относительно устройства индикации 4.

В верхней части 5 корпуса 1 расположено место крепления 6 заправочного шланга 12. Между частями шланга установлено разрывное устройство 7. На конце шланга установлена заправочная головка 11.

Сжатый природный газ от АГНКС подводится к штуцеру фильтра, через шаровый кран и электромагнитный клапан поступает в кориолисовый массомер. После этого газ по трубопроводу поступает в заправочную головку 6 и дальше – в баллоны заправляемого автомобиля.

Шаровый кран предназначен для аварийной остановки подачи газа в колонку. Между краном и заправочным шлангом установлен индикатор давления (манометр) для визуального контроля за давлением заправки и давлением газа в заправочном шланге. Эта же информация отображается на индикаторе электронного блока.

Разрывное устройство предназначено для предотвращения разрыва заправочного шланга в случае отъезда автомобиля от колонки с не отсоединенной заправочной головкой. Работа колонки заключается в периодичной заправке газобаллонных автомобилей сжатым природным газом до давления 24,5 МПа с выводением информации об объёме (массе), его стоимости и цене заправляемого газа на блок индикации» [26].

3.2 Заправка компримированного природного газа на автомобильной газозаправочной станции

«Основное отличие газа от жидкого моторного топлива (ЖМТ) в том, что объем ЖМТ можно считать постоянным, а газ сильно изменяет свой объем в зависимости от температуры. Автомобильные баллоны со стандартным давлением 20 МПа при температуре 15°C содержат разную массу газа при разной температуре окружающей среды.

С одинаковым давлением при температуре 30°C баллоны будут вмещать на 15% меньше газа, чем при минус 15°C. Газ при заправке нагревается, это повышает давление и уменьшает массу заправки ещё на

10%. Запас хода транспорта между заправками снижается и становится нестабильным. Также надо отметить, что время заправки автомобиля газом больше, чем при заправке ЖМТ, что создаёт дополнительное препятствие к переводу автотранспорта на газ» [15].

Традиционно заправка выполняется до заданного давления в баллоне. При заправке измеряется давление газа, по достижении заданного значения блок управления останавливает заправку.

Измерить давление прямо в баллоне невозможно, измеряется давление в заправочном шланге. Оно больше давления в баллоне, перепад пропорционален расходу газа при заправке (рисунок 5).

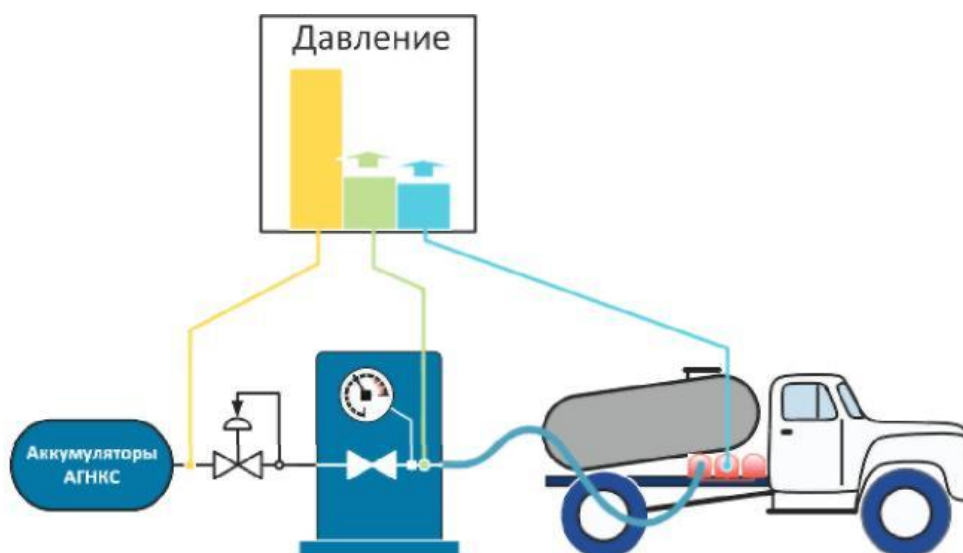


Рисунок 5 – Типовая схема заправки

«Чтобы обеспечить контроль давления, его ограничение и заправку до заданной величины, перед колонкой устанавливается регулятор, уменьшающий давление и перепад на заправочном устройстве. При этом снижается расход газа, особенно в конце заправки, что заметно увеличивает её длительность» [5].

По такой схеме работают колонки на АГНКС, построенные в 1980-х годах (рисунок 6).

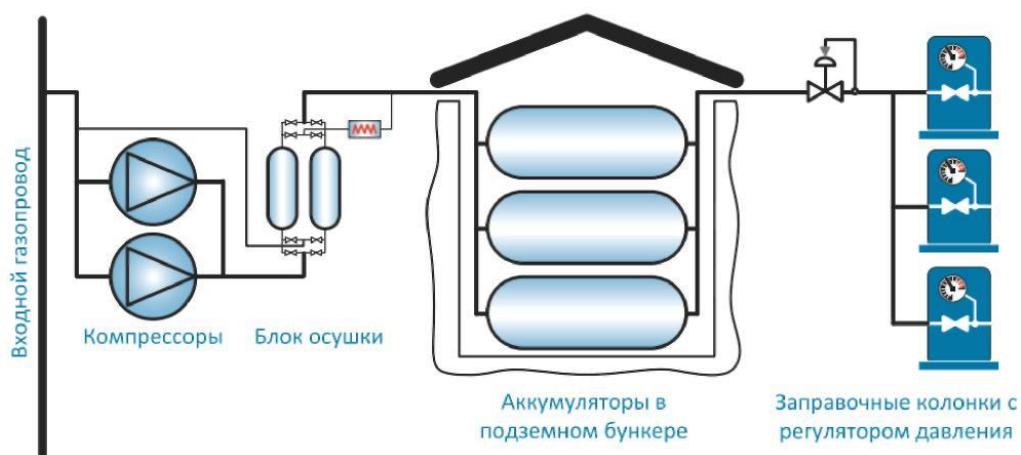


Рисунок 6 – Структура АГНКС в 1980-х годов

«Аккумуляторы газа имеют большой объем и расположены в подземном бетонном бункере. Кроме безопасности, данное решение обеспечивает примерно постоянную температуру газа в течение года. Коммерческий расчёт производится с помощью таблиц давления в баллоне, объёма баллона и температуры воздуха, то есть без прямого измерения массы проданного газа. Данная схема неплохо сбалансирована с точки зрения безопасности и наполняемости баллонов. Газ хранится под землёй в больших ёмкостях, сезонные изменения мало влияют на его температуру. В любое время года температура газа в баллонах автомобиля в конце заправки примерно одинакова. Обеспечивается не оптимальная, но довольно стабильная наполняемость баллонов в разное время года» [23].

«Однако у этой схемы есть несколько важных недостатков:

- регулятор давления ограничивает скорость заправки, он сложен в настройке, дорог и недостаточно надёжен;
- происходит недозаправка баллонов из-за их нагрева;
- неточно оценивается масса проданного газа;
- требуется большая площадь для аккумуляторов, обязателен контроль загазованности в закрытом подземном бункере, большой объем и подземное расположение аккумуляторов усложняют их испытания, проводимые раз в 5 лет» [23].

Процесс заправки баллона.

«Газ в баллоне автомобиля нагревается при заправке от резервуара со сжатым газом (аккумулятор). На АГНКС это хорошо известное явление приводит к недозаправке. Возникает вопрос: откуда берётся нагрев баллона, ведь газ охлаждается при расширении, если отсутствует теплообмен? Зачастую на газозаправочных колонках именно из-за этого обмерзают заправочные устройства и клапаны. Почему же газ в баллоне нагревается выше начальной температуры? При движении через трубопроводы и заправочное устройство газ набирает скорость, расширяется, что вызывает его охлаждение. Затем поток газа тормозится в заправляемом баллоне, заново сжимается и нагревается» [25].

Важно, что конечная температура выше, чем температура в аккумуляторах газа, так как избыточная энергия газа переходит в теплоту (рисунок 7).

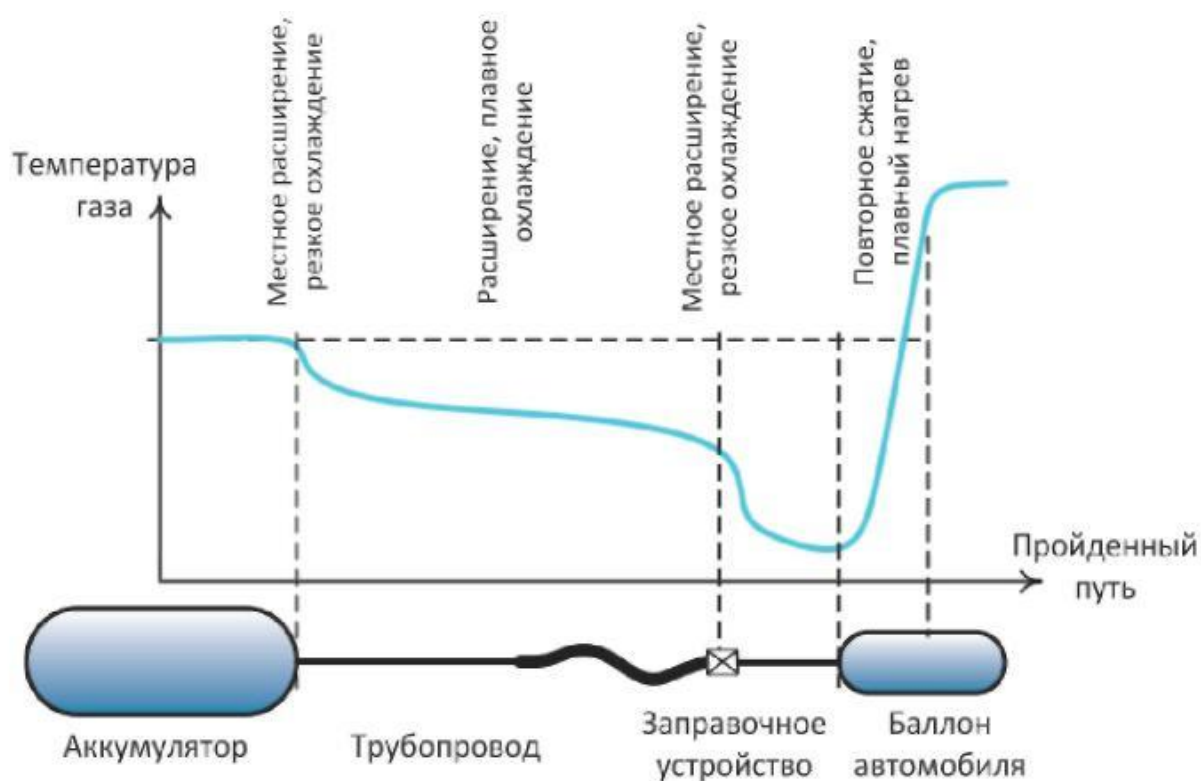


Рисунок 7 – Изменение температуры газа при его движении из аккумулятора в баллон

«Нагрев обусловлен следующими причинами:

- давление в аккумуляторах выше, чем давление в баллоне, особенно в начале заправки;
- газ быстро проходит путь до баллона, теплообмена с окружающей средой практически нет, он происходит уже в баллоне, из-за этого композитный баллон, хуже проводящий тепло, нагревается сильнее, чем металлический.

Нагрев приводит к повышению давления в баллоне и остановке заправки. В баллон попадает меньше газа, чем он мог бы вместить при таком давлении и температуре окружающей среды.

Избежать нагрева можно, если сделать движение газа очень медленным, уменьшив перепад давлений на всем пути движения. Но понятно, что на практике никого не устроит очень медленная заправка» [4].

Современная технология заправки транспорта.

«Современные АГНКС имеют важные отличия от АГНКС 1980-х годов: заправка по массе, отказ от регуляторов давления перед газозаправочной колонкой;

- наземное хранение газа;
- разделение аккумуляторов на секции с различным давлением газа.

Эти отличия оптимизируют стоимость заправочных станций, повышают эффективность и безопасность заправки» [29].

Заправка по массе без регулятора давления.

Уменьшить время заправки можно, если не ограничивать расход газа регулятором, а дать ему возможность двигаться с максимально возможной скоростью.

Современные расходомеры позволяют точно измерять массу газа, прошедшего через трубу, а контроллеры колонок — автоматически определять объем баллона (рисунок 8).

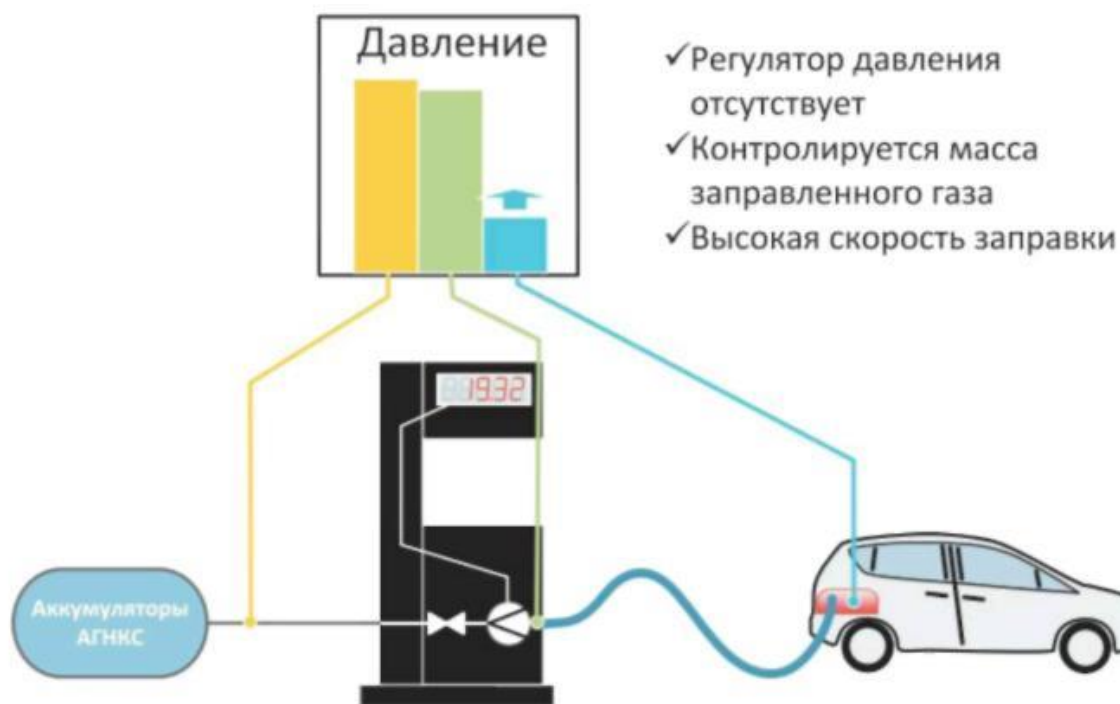


Рисунок 8 – Современная схема заправки

«При заправке блок управления ГЗК оценивает объем баллона и рассчитывает такую массу газа, которая создаст заданное давление с учётом сжатия и точно рассчитанным запасом на нагрев баллона. Заправка заканчивается по достижении заданной массы, как на ТРК для жидкого топлива. Отсутствие регулятора давления заметно увеличивает скорость наполнения баллонов, а расчёт массы и давления с учётом нагрева позволяет повысить наполняемость баллона. Также повышается стабильность заправки при разной температуре воздуха, так как дозируется именно масса, а не объем и давление газа.

Клиент АГНКС может быть уверен, что в любое время года он получит одинаковую массу газа, а значит, одинаковый пробег транспорта между заправками, что важно при коммерческом использовании автомобиля и планировании его загрузки» [33].

На рисунке 9 показан график хода заправки на газозаправочной колонке ЛПА-ГЗК.

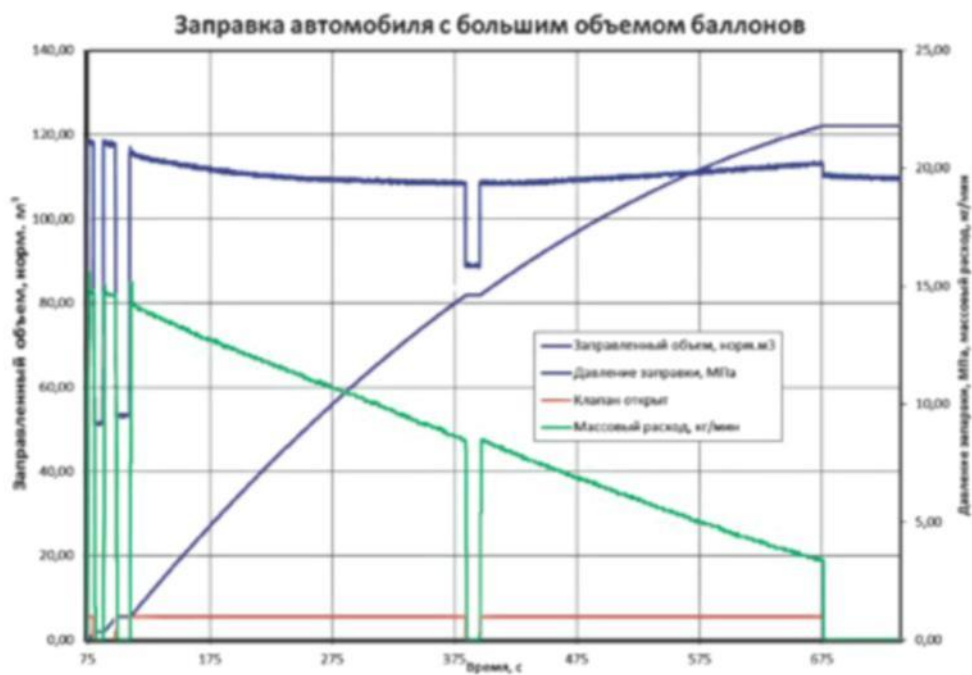


Рисунок 9 – График хода заправки

«Заправка выполняется по массе (с автоматическим измерением объёма баллона) без регулятора давления. В этом примере заправка 122 м³ газа (примерно эквивалентно 122 л бензина или ДТ) выполнена за 10 мин, что является хорошим результатом. После заправки и выравнивания температуры баллона устанавливается давление 19,6 МПа, равное заданному.

Снижаются затраты на строительство АГНКС, поскольку не нужен бункер с системой контроля загазованности, достаточно подготовленной площадки. Недостаток в том, что температура хранимого в аккумуляторах газа зависит от температуры окружающей среды. Зимой заправляется заметно больше газа, чем летом, и давление в баллоне может опасно повыситься, если автомобиль после заправки поместить в тёплый гараж. Только при заправке по массе с учётом температуры окружающего воздуха эксплуатация автомобилей будет полностью безопасной со стабильным заполнением баллонов в любое время года.

Метод разделения аккумуляторов на секции с различным давлением уменьшает энергозатраты на сжатие газа, увеличивает пропускную

способность АГКНС и повышает эффективный (работающий) объем аккумуляторов» [34].

Эксплуатация АГКНС.

«Ввести в эксплуатацию автомобильную газонаполнительную компрессорную станцию (АГКНС) – дело совсем не простое. Заправка является объектом, где газ не только реализуется, но и подвергается комплексной обработке. До сих пор так и не разработаны специальные нормативные документы, регулирующие их организацию. Компании вынуждены учитывать большое количество государственных стандартов, строительных, экологических норм, правил пожарной безопасности и так далее. ПАО Газпром нефть приводит следующий перечень этапов, которые необходимо пройти, прежде чем приступить непосредственно к строительным, монтажным и пусконаладочным работам:

- выбор и оформление земельного участка (который должен быть расположен на приемлемом удалении от газопровода территориальной газотранспортной системы);
- получение согласований и разрешений на внешнее инженерное обеспечение, включая газоснабжение и электроснабжение;
- получение доступа к фондам природного газа и согласований на его транспортировку по газотранспортной системе РФ;
- проведение инженерных изысканий на земельных участках, отведенных под строительство объекта и коммуникаций внешнего инженерного обеспечения;
- выбор поставщика основного технологического оборудования и заказчика по проектированию и строительству;
- проектирование объекта и коммуникаций внешнего инженерного обеспечения
- разработка и согласование в ходе проектирования специальных технических условий по сокращению санитарно-защитных зон и противопожарных разрывов в условиях городской застройки.

- государственная защита проектной документации, поскольку заправочная станция относится к категории опасных производственных объектов» [28].

Состав проектной документации включает 13 разделов с многочисленными подпунктами.

«Для того чтобы осуществить проект, ключевыми являются три основных условия.

Во-первых, наличие подходящего участка, отвечающего нескольким важным требованиям:

- удобство для подъезда машин в соответствующие зоны;
- расположение на определённом расстоянии от различных объектов – 25 м от промышленных предприятий, 30 м – от лесных массивов хвойных и смешанных пород (для лиственных пород достаточно 12 м), 35 м – от жилых и общественных зданий, 30 м – от железной дороги, 12 м – от автомобильной (рисунок 10)» [25].

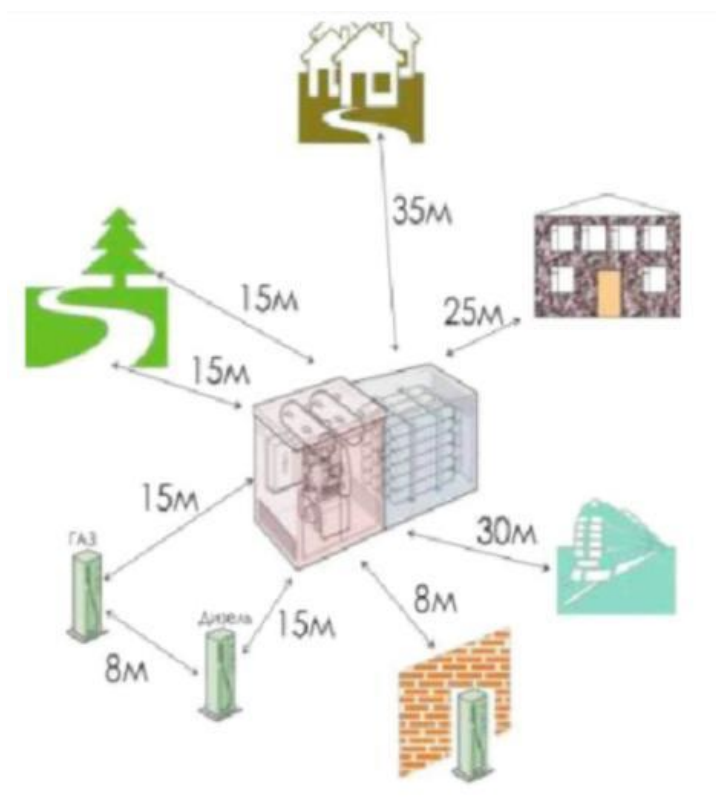


Рисунок 10 – Условия размещения оборудования АГНКС

«Во-вторых, доступность газовой трубы с минимальным давлением в 2 атмосферы. Чем выше давление, тем меньшей мощности требуются компрессоры АГНКС и, соответственно, тем ниже эксплуатационные расходы. От газоснабжающей организации должны быть получены лимиты газа.

В-третьих, достаточная электрическая мощность – около 300-500 кВт.

Также одним из основных моментов – это найти в условиях городской застройки подходящий участок, отвечающий всем необходимым требованиям. Процедуры выделения и оформления земельных участков под строительство, получения всех разрешительных документов и согласований, а также технических условий на подключение к сетям газо- и электроснабжения занимает основную часть времени от проектирования до ввода в эксплуатации автомобильной газонаполнительной компрессионной станции. Цена объекта, согласно цифрам, приводимым ПАО «Газпром нефть», стоимость оборудования, в зависимости от производительности и формата, может достигать 110 млн. рублей, а расходы на строительство составляют приблизительно 90 млн рублей» [27].

Эксплуатация компрессорных установок должна отвечать требованиям Правил устройства и безопасной эксплуатации поршневых компрессоров, работающих на взрывоопасных и токсичных газах, Руководство по эксплуатации компрессорной установки и Правил технической эксплуатации и безопасного обслуживания оборудования автомобильных газонаполнительных компрессорных станций.

«При эксплуатации компрессорных установок выполняются следующие виды технического обслуживания:

- ежемесячное,
- через каждые 500 ч. – техническое обслуживание,
- через каждые 1500 ч. – техническое обслуживание,
- через каждые 3000 ч – текущий ремонт,
- через каждые 6000 ч. – текущий ремонт,

- через каждые 12000 ч. – средний ремонт,
- через каждые 36000 ч. – капитальный ремонт» [20].

«Результаты технического обслуживания и ремонтов должны фиксироваться в ремонтном формуляре на компрессорную установку.

Подготовка компрессора: путём приведения в действие клавишного выключателя компрессор-подготовк» обеспечивается готовность компрессора к работе. Клавишный выключатель находится в пункте управления, и на месте на стойке для приборов. Если предусматривается управление компрессором на месте, то следует в пункте управления привести в действие переключатель по ключу, который служит для переключения обслуживания с пункта управления на на месте.

В положении «на месте» возможно, вытянуть ключ. Этап «подготовка компрессора» служит для подогрева смазочного масла до потребляемой минимальной температуры в 20°C» [21].

В компрессорных помещениях должна быть обеспечена исправная и бесперебойная работа вентиляционных установок. При неисправной и выключенной вентиляции работа компрессоров не разрешается.

Компрессорное оборудование и помещение компрессорной должны содержаться в чистом виде.

Не разрешается устанавливать в компрессорной емкости для хранения масел. Запрещается загромождать проходы между компрессорами, материалами, оборудованием или какими-либо предметами.

Все трущиеся части компрессора должны регулярно смазываться. При смазке не должно допускаться растирание и разбрызгивание смазочных материалов.

«Ремонт компрессора во время работы запрещается. Ремонтные работы в компрессорной могут производиться только при условии применения инструментов и способов работ, исключая возможность искрообразования и применения огня.

В корпусе компрессоров должны быть заземлены независимо от заземления электродвигателей. Подшипники компрессоров должны иметь достаточное количество смазки. Не допускается перегрев подшипников выше установленной нормы.

Эксплуатировать компрессоры с неисправными или отключенными блокирующими и сигнализирующими устройствами запрещается.

При остановке компрессора на продолжительное время, спускные краники, пробки и предохранительные клапаны должны быть открыты. Ремонт электропроводки и смена электрических ламп в компрессорной, разрешается только при обесточенной сети.

При загорании, электродвигателей и электропроводки тушить только углекислотными огнетушителями, песком или кошмой. Категорически запрещается тушить водой и пенными огнетушителями.

При появлении и помещении компрессорной или в непосредственной от нее близости большого количества газа, обслуживающему персоналу необходимо принимать меры безопасности согласно плану ликвидации аварии» [31].

АГНКС рассчитана на непрерывную работу без полных остановок на планово-предупредительные ремонты.

«Номинальными условиями на всосе компрессорных установок являются:

- давление газа – $0,3 \div 0,5$ МПа,
- температура газа – от минус 15 до плюс 15°C.

Расчётная производительность АГНКС по газу в первую смену – 3456 м³/ч.

Для обеспечения проектной производительности АГНКС на последней установлены две компрессорные установки типа 4HR3KN -200/210-5-249 WLK. Компрессорная установка производится в действии с электродвигателем мощностью 320 кВт» [9].

На линии нагнетания компрессорных установок природный газ находится при:

- давлении – до 24,5 МПа,
- температуре – до 40°C.

«АГНКС включает производственно-технологический корпус и наружную установку отдельного технологического оборудования, автозаправочную с навесом из восьми постов с колонками и внешние инженерные коммуникации газопровод подключения к газовым сетям, водопровод от городских сетей для хозяйственно-бытовых и противопожарных нужд, сеть канализации, теплопроводы, линии электропередачи от местных электросетей напряжением 6-10 кВ и телефонный кабель от сети местной телефонной станции).

Технологическое оборудование в основном размещают в производственно-технологическом корпусе, который включает компрессорное отделение, воздушную компрессорную, отделение охлаждения воды и насосного оборудования, комплектную трансформаторную подстанцию КТП, вентиляционную камеру, щитовую, механическую мастерскую, отделение запорно-регулирующей арматуры, бытовые помещения и операторную» [20].

«Наружная установка технологического оборудования включает аккумуляторы газа, аппараты воздушного охлаждения, сепараторы и другое.

В компрессорном отделении станции размещены компрессорные установки с холодильниками, установка осушки газа, блок редуцирования давления газа с 25 до 20 МПа, поступающего из сосудов-аккумуляторов в направлении к газозаправочным колонкам.

В насосном отделении станции установлено оборудование для обеспечения циркуляции воды в системе охлаждения газа и компрессорных отделении» [1].

«В воздушной компрессорной размещены компрессоры для подачи воздуха в систему управления продувочными клапанами газовых компрессорных установок.

Как привод используется двухскоростной электродвигатель, который продувается воздухом, в фланцевом исполнении НЧТ5-П с частотой оборотов 740/370 за минуту. Напряжение питания двигателя 380 В. Электродвигатель лимитирует частоту пусков компрессорной установки, она не должна превышать 5 включений в час, равномерно разделённых в часе. Допустимое число переключений частоты оборотов с 740 на 370 об/мин не больше 20 в час, при этом не раньше, как через 3 минуты. Конструкция обеспечивает трехпозиционное регулирование подачи 100-50-0 %. Подача установки 470...940 м³/час при поглощении мощности 62...125 кВт» [3].

«Автозаправочные станции (АГНКС) предназначены для обслуживания и заправки автомобилей и других машин горючим и смазочными материалами. Попутно на них реализуются масла, смазки и специальные жидкости, расфасованные в мелкую тару. К вспомогательным операциям, выполняемым на АГНКС, относятся мойка машин, их мелкий ремонт, торговля запасными частями. Неотъемлемой частью современных АГНКС являются кафе и магазин по торговле продуктами повседневного спроса» [2].

«По способу установки и монтажа оборудования АГНКС делятся на стационарные и передвижные. Передвижные АГНКС (АГНКС) монтируются на раме и в зависимости от их назначения устанавливаются на автомобиле или автоприцепе. Они состоят из ёмкости, измерительных и раздаточных устройств, смонтированных на шасси транспортного средства. Стационарные АГНКС сооружаются по типовым проектам на 300, 500, 750 и 1000 заправок в сутки (1 заправка – 50 л топлива и 2 л масла).

В их состав входят:

- подземные резервуары для хранения нефтепродуктов,
- топливо- и маслораздаточные колонки,

- помещения для обслуживающего персонала,
- другие помещения в соответствии с дополнительными функциями, выполняемыми АГНКС» [5].

«Основной отличительной особенностью стандартной АГНКС и рассматриваемой АГНКС является оборудование позволяющее насыщать природный газ водородом. За рубежом широко распространяются бортовые генераторы синтез-газа, но в таком случае приобретать данное оборудование придётся собственникам транспортных средств, что не скажется на хорошую покупательную способность водородонасыщенного природного газа. Поэтому принимается решение рассмотреть стационарный вариант заправочной станции.

Таким образом, можно выделить два варианта использования водородонасыщенного природного газа в качестве моторного топлива:

- модернизация действующей АГНКС,
- строительство новой АГНКС.

Более предпочтительным вариантом принимаем модернизацию действующей АГНКС.

Существующие автомобильные газонаполнительные компрессорные станции (АГНКС) требуют модернизации для работы с водородными смесями» [31].

Традиционные АГНКС предназначены для работы с компримированным природным газом (CNG), но водород обладает рядом особенностей, требующих модификации:

- высокая диффузионная способность, соответственно риск утечек через микротрещины;
- водородное охрупчивание металлов, соответственно необходимость замены стальных компонентов на нержавеющие или композитные;
- низкая энергия воспламенения и, как, следствие, повышенные требования к пожаробезопасности.

Перед модернизацией требуется провести аудит станции, включая: оценку состояния компрессоров, трубопроводов, заправочных колонок; проверку герметичности соединений; анализ возможности работы оборудования при повышенном давлении (если H_2 подается отдельно).

Основные направления модернизации АГНКС.

Модернизация компрессорного оборудования: замена стандартных компрессоров на водородосовместимые (мембранные или многоступенчатые поршневые с уплотнениями из PTFE); установка дополнительных фильтров для очистки водорода от примесей (влаги, CO, сернистых соединений).

Адаптация системы хранения и транспортировки: замена стальных трубопроводов на трубы из нержавеющей стали (AISI 316L) или композитных материалов; использование уплотнителей, стойких к водороду (фторопласт, Viton), модернизация газгольдеров или установка новых, рассчитанных на смесь $CH_4 + H_2$ (обычно до 20–30% H_2).

Система смешивания и дозирования HCNG: внедрение динамических смесителей для точного контроля пропорций H_2 и CNG; установка газоанализаторов для мониторинга состава смеси.

Повышение уровня безопасности: монтаж датчиков утечки водорода (каталитические или электрохимические); улучшение вентиляции (принудительная вытяжка в верхней части помещений); установка аварийных отсечных клапанов и систем пожаротушения (например, азотного).

Перевод АГНКС на HCNG требует соответствия новым стандартам: международные: ISO 16923 (CNG станции), ISO 16111 (водородные баллоны); национальные: в РФ – СП 62.13330, Р 55890-2020 (водородная безопасность); испытания: гидроиспытания, проверка на герметичность, тесты на ударопрочность.

Составим приблизительную экономику проекта по переоборудованию действующей АГНКС под использование водородонасыщенного топлива (HCNG) по сравнению со строительством новой АГКС под HCNG и представим ее в виде таблицы 3.

Таблица 3 – Экономика проекта по переоборудованию действующей АГНКС под использование HCNG по сравнению со строительством новой АГНКС

Параметр	Доработка существующей АГНКС	Новая АГНКС под HCNG
Затраты	+15–30% к стоимости модернизации	На 20–40% дороже обычной АГНКС
Срок окупаемости	3–7 лет (зависит от спроса)	5–10 лет
Экологический эффект	Снижение выбросов CO на 20-50%	До 70% при 30% H ₂

Окупаемость проекта зависит от спроса на HCNG, но при государственной поддержке может составить 3–7 лет. Доработка АГНКС для HCNG – сложный, но реализуемый проект, требующий пересмотра материалов, оборудования и систем безопасности. Ключевыми этапами являются аудит существующей инфраструктуры, замена критических компонентов и внедрение систем контроля. Перспективы развития HCNG в России зависят от нормативной базы и субсидирования «зеленых» технологий. Это реалистичный шаг к декарбонизации транспорта, особенно для коммерческого сектора.

Выводы по разделу.

Водородонасыщение компримированного природного газа (КПГ) на АГНКС технически осуществимо, но требует модернизации оборудования для обеспечения безопасности и эффективности. Ключевые узлы станций (компрессоры, системы хранения, заправочные модули) должны быть адаптированы под свойства водородно-газовых смесей.

Особенности работы АГНКС с водородными добавками

- добавление водорода влияет на параметры заправки (скорость, давление, температурный режим), что требует корректировки стандартных процессов;
- необходим контроль за возможными утечками и рисками воспламенения из-за высокой диффузионной способности водорода.

Для массового внедрения требуется развитие нормативной базы, стандартов безопасности и специализированного оборудования.

Заключение

Выполнение бакалаврской работы позволило всесторонне изучить перспективы использования сжиженного природного газа и его водородных смесей в качестве альтернативного моторного топлива.

СПГ является экономически выгодным и экологически безопасным видом топлива, обладающим значительными преимуществами перед традиционными нефтепродуктами и другими альтернативами. Государственная поддержка в виде налоговых льгот и субсидий способствует его распространению, однако для масштабного перехода требуется дальнейшее развитие инфраструктуры заправочных станций.

Несмотря на богатый научно-технический задел в России, массовое внедрение водородного транспорта сдерживается высокой стоимостью технологий. Водородно-метановые смеси (HCNG) представляют собой компромиссное решение, позволяющее снизить вредные выбросы при сравнительно небольших модификациях существующих двигателей и заправочных систем.

Изучение водородонасыщения СПГ на АГНКС выявило техническую возможность подобной модернизации, однако для ее реализации необходимо решить ряд инженерных задач, связанных с безопасностью, совместимостью оборудования и стандартизацией процессов заправки.

Комбинированное использование СПГ и водородных добавок обладает значительным потенциалом для снижения углеродного следа транспорта в среднесрочной перспективе. Для успешной реализации этой концепции требуется:

- развитие нормативной базы и стандартов безопасности,
- модернизация заправочной инфраструктуры,
- стимулирование спроса через государственные программы поддержки.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Арский А.К. Природный газ в энергетике США [Текст] / Под ред. В.М. Гальперина. Москва; Ленинград: Госэнергоиздат, 1963. 208 с.
2. Белоусов Б.Н. Колесные транспортные средства особо большой грузоподъемности / Б.Н. Белоусов, С.Д. Попов. Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006 (М.: Типография «Наука»). 727 с.
3. Боксерман Ю.И. Перевод транспорта на газовое моторное топливо [Текст] / Ю.И. Боксерман, Я.С. Мкртычан, К.Ю. Чириков. М.: Недра, 1988. 218 с.
4. Борц А.Д. Диагностика технического состояния автомобиля / А.Д. Норц, Я.К. Закин, Ю.В. Иванов. М.: Транспорт, 1979. 160 с.
5. Вахламов В.К. Техника автомобильного транспорта: Подвиж. состав и эксплуатац. свойства: Учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности «Организация перевозок и упр. на трансп. (автомобил. трансп.) направления подгот. дипломир. специалистов «Организация перевозок и упр. на трансп.» / В.К. Вахламов. Москва: Academia, 2004 (ГУП Сарат. полигр. комб.). 521 с.
6. Верзаков Г.Ф. Введение в техническую диагностику / Г.Ф. Верзаков, Н.В. Кипшт, В.И. Рабинович. М.: Энергия. 1968. 219 с.
7. Гавриленко С.Д. Программные шаги газомоторизации [Текст] / С.Д. Гавриленко // Газовая промышленность. 1997. 45 с.
8. Галкин В.И. Транспортные машины: учебник для вузов. Москва: Издательство «Горная книга»: Издательство МГГУ, 2010. 587 с.
9. Говорущенко Н.Я. Диагностика технического состояния автомобилей / Н.Я. Говорущенко. М.: Транспорт, 1975. 305 с.
10. Говорущенко Н.Я. Диагностика технического состояния автомобилей / Н.Я. Говорущенко. М.: Транспорт, 1970. 254 с.
11. Горина Л.Н. Раздел выпускной квалификационной работы «Безопасность и экологичность технического объекта». Учеб.-метод. пособие

/ Л.Н. Горина, М.И. Фесина; ТГУ; Ин-т машиностроения; каф. «Управление промышленной и экологической безопасностью». Тольятти: ТГУ, 2018. 41 с.

12. ГОСТ 27577-2000. Газ природный топливный компримированный для двигателей внутреннего сгорания. Технические условия. М: ИПК Издательство стандартов, 2000. 15 с.

13. ГОСТ 305-2013. Топливо дизельное. Технические условия. М: ИПК Издательство стандартов, 2013. 14 с.

14. Грачев Ю.П. Математические методы планирования эксперимента / Ю.Л. Грачев. М., 1979. 195 с.

15. Гришкевич А.И. Автомобили. Теория. Учебник для вузов / А.И. Гришкевич. Мн.: Высш. шк., 1986. 208 с.

16. Гурин В.В., Замятин В.М., Попов А.М. Детали машин. Курсовое проектирование. Ч 1. Учебник. М.: Юрайт, 2016. 368 с.

17. Дуарь В.С. Альтернативные виды топлива // Молодой ученый. – 2018. – №2(188). – С. 168-171. URL:<https://moluch.ru/archive/188/47739/> (дата обращения: 17.03.2025 г.)

18. Емельянов В.Е., Крылов И.Ф. Альтернативные экологически чистые виды топлив для автомобилей. М.: АСТ Астрель, 2015. 128 с.

19. Куклин Н.Г., Куклина Г.С., Житков В.К. Детали машин: учебник для студентов ВУЗов. – 9-е изд. перераб. и доп. М.: Курс, 2015. 512 с.

20. Марченко А.П., Елистратова С.В. К вопросу развития применения газомоторного топлива. Educatio. №4 (11)-4, 2015. С. 31-33.

21. Мухина М.В. Устройство автомобиля. Ч. 2. Системы питания двигателей: Учебно-методическое пособие / М.В. Мухина, В.В. Глебов, И.А. Григорьева. Н. Новгород: НГПУ, 2016. 43 с.

22. Николайчук Л.А., Дьяконова В.Д. Современное состояние и перспективы развития рынка газомоторного топлива в России // Интернет-журнал «Науковедение», том 8, №2. 2016. 38 с.

23. Панов Ю.В. Установка и эксплуатация газобаллонного оборудования автомобилей. М.: Академия, 2015. 160 с.

24. Певнев Н.Г. Техническая эксплуатация газобаллонных автомобилей / Н.Г. Певнев, А.П. Елгин, Л.Н. Бухаров. Омск: Изд-во Сибирской гос. автомобильно-дорожной академии, 2016. 183 с.
25. Пронин Е.Н., Поденок С.Е. Проект «Голубой коридор»: эколого-экономическая модель использования природного газа в качестве моторного топлива в международном автомобильном сообщении. М.: ИРЦ «Газпром», 2016. 46 с.
26. Сметанин В.И. Защита окружающей среды от отходов производства и потребления: Учеб. пособие / В. И. Сметанин. Москва: КолосС, 2003. 230 с.
27. Сухочев Г.А. Разработка технологического процесса изготовления детали: Учеб. пособие / Г.А. Сухочев, К.А. Яковлев; М-во образования Рос. Федерации, Воронеж. гос. лесотехн. акад. Воронеж: ВГЛТА, 2002. 67 с.
28. Транспортное обеспечение производства: учебное пособие / О.А. Лукашук, В.С. Великанов, А.А. Маркина, К.Ю. Летнев; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. Екатеринбург: УрФУ, 2024. 133 с.
29. Экология транспорта: учебник. / Е.И. Павлова. М.: Высш. шк., 2010. 366 с.
30. Arnold M. Simulation Algorithms in Vehicle System Dynamics / M. Arnold // Technical Report 27. - Martin-Luther-University Halle, Department of Mathematics and Computer Science, 2004. 27 p.
31. Lowndes E.M. Development of an Intermediate DOF Vehicle Dynamics Model for Optimal Design Studies / E.M. Lowndes, - Raleigh, 1998. 209 p.
32. Pettersson M. Driveline Modeling and Control / M. Pettersson. Linkoping, 1997. 150 p.
33. Puhs Allen E., Hybrid vehicles. CRC Press, London NewYork 2009. 505 p.
34. Wagner G. Transmission options / Gerhard Wagner// Automotive Engineering International. 2001. Vol. 7 (109). 64 – 70 p.