

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

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра

Энергетические машины и системы управления

(наименование)

13.04.03 Энергетическое машиностроение

(код и наименование направления подготовки)

Энергетические комплексы и системы управления

(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Повышение эффективных показателей стационарных дизельных установок

Обучающийся

Е.В. Нахратова

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный

руководитель

к.т.н., доцент, Д.А. Павлов

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2023

Содержание

Введение	4
1. Анализ состояния вопроса и задачи исследований	8
1.1. Стационарные дизельные установки.....	8
1.2. Практика использования водорода в качестве добавки к дизельному топливу	10
1.3. Исследование показателей дизельного двигателя при добавлении водорода.....	18
1.4. Применение водородосодержащих газообразных веществ (на примере метанола)	23
1.5. Применение в дизельных двигателях спиртового топлива (на примере этанола).....	27
1.6. Влияние воды на характеристики дизельного топлива.....	31
2. Патентные исследования	40
2.1. Исследование уровня вида техники	40
2.1.1. Описание объекта техники.....	40
2.1.2. Определение стран проверки	40
2.1.3. Определение рубрик МКИ и УДК	41
2.1.4. Выбор глубины поиска.....	44
2.1.5. Определение источников информации	44
2.2. Способы подачи топлива и устройства для его получения.....	45
3. Описание теоретических и экспериментальных исследований о влиянии водо-водородной добавки на экономические и экологические показатели дизеля.....	57
3.1. Проведение экспериментальных исследований	58
3.2. Порядок проведения испытаний.....	60
3.3. Обработка и анализ результатов испытаний.....	62
3.4. Результаты испытаний	64

4. Экономическая эффективность использования добавки ВВТ к дизельному топливу	68
Заключение	69
Список используемой литературы и используемых источников	71

Введение

В настоящее время в энергетическом машиностроении все более широкое распространение получают двигатели внутреннего сгорания (ДВС), которые работают не только на обычном традиционном топливе. Традиционное топливо получают непосредственно из нефтепродуктов. Новый же вид топлива, активизирующий процесс сгорания, носит название «альтернативное топливо» или «альтернативные добавки» [18]. Поиск нового вида топлива неслучаен: многочисленные исследования ученых показывают, что количество запасов нефти на Земле постоянно сокращается. В ближайшем будущем это может привести к ее ощутимому дефициту. Известно, что уже в настоящее время дефицит нефти – 4 млн барр./день; предполагается, что буквально через 2-3 года эта цифра увеличится в 5 раз. Кроме того, по той же самой причине наблюдается тенденция регулярного увеличения цен на нефтепродукты [31]. Данные наблюдения высвечивают довольно серьезную проблему в современном двигателестроении – это повышение топливной экономичности. Поэтому на сегодняшний день экономия топлива – это одна из приоритетных задач и постепенно она становится первоочередной [13].

Сокращение запасов нефти и нефтепродуктов приводит к поиску и разработке других энергоресурсов, которые позволят частично или полностью заменить традиционное нефтяное топливо. Для улучшения характеристик ДВС и экономии нефти возможно применение смесей традиционных топлив с добавками ненефтяного происхождения [3].

Также технический прогресс неизменно ведет к появлению дефицита мощностей. Несмотря на то, что в сфере энергетики постоянно появляются новые и более мощные агрегаты, к сожалению, они не всегда способны удовлетворить требования потребителя, которые с каждым годом становятся только выше. Помимо этого, качество энергоснабжения на сегодняшний день далеко не идеально и на электростанциях зачастую случаются поломки. Все

это является предпосылками постоянного внедрения новых источников электропитания, одним из которых является дизельная электростанция [7].

Тема данной диссертации посвящена поиску и решению проблем повышения эффективных показателей стационарных дизельных установок на примере применения более современных добавок к топливу, позволяющих обеспечить эффективный расход этого топлива.

Повышение эффективных показателей стационарных дизельных установок может раскрывать не только явно выраженные плюсы новых разработок, но и недостатки. По этой причине необходимо провести оценку и полный анализ различных способов улучшения данных показателей и получить точные и детально проверенные выводы.

Изучить и проанализировать по выбранной теме имеющиеся труды и научную литературу, как русских, так и зарубежных авторов. Определить существующие рекомендации по повышению эффективности и совершенствованию данных установок.

Объяснить модернизацию уже действующих разработанных способов и устройств целесообразностью замены на более улучшенные и современные модели.

Представить новые оригинальные методы повышения эффективных показателей, в настоящее время неприменяемые в действующих устройствах. Выявить степень значимости и необходимости в их изменении.

Объектом исследования является дизельный двигатель стационарного исполнения, предмет исследования – изучение влияния на экономические и экологические показатели ДВС нового вида топлива.

Проблема исследования состоит в том, что используемое в настоящее время топливо не позволяет улучшить эффективные показатели стационарных дизельных установок. За счет того, что на такие дизельные установки приходится большая нагрузка (по причине их прямого функционального назначения), при осуществлении их работы по-прежнему происходит большой расход топлива.

Методы исследования «рабочего процесса применяются в работе как теоретические, так и экспериментальные, известные и апробированные на практике и специально разработанные для решения поставленных задач» [31].

Актуальность данной работы заключается в том, что согласно концепции развития двигателестроения, а также в целях решения проблем по улучшению экологической обстановки в современном мире, все более широкое применение находит разработка и использование более дешевых и экологичных топлив. Наиболее перспективное направление – использование топлива для дизелей, в основе которого применяются такие компоненты как вода и водород.

В связи с этим, работы, направленные на исследование данных вопросов, а также решения по использованию водо-водородного топлива в качестве добавки к основному топливу для дизелей в отрасли двигателестроения являются достаточно актуальными, а также научно и практически значимыми. Помимо двигателестроения развитие этого направления важно и в тех отраслях, где также применяют и эксплуатируют дизельные средства и двигатели.

Целью данной работы является повышение эффективных показателей стационарных дизельных установок за счет снижения удельного эффективного расхода топлива путем применения топливных водо-водородных добавок.

Для решения данной проблемы были поставлены следующие задачи:

- провести аналитический обзор существующей литературы по данному вопросу;
- установить перспективные направления;
- определить такие добавки к топливу, которые позволят улучшить эффективные показатели стационарных дизельных установок;
- выявить предполагаемый способ обеспечения повышения эффективных показателей на 3-7%;

- теоретически и экспериментально обосновать предложенные решения (подтвердить экспериментально).

Научная новизна: предложение оригинального комбинированного метода добавки водо-водородного топлива в ДВС; результаты теоретического исследования влияния водо-водородного топлива на экономические и экологические показатели работы дизельного двигателя.

Теоретическая значимость исследования заключается в расширении представления о возможностях использования сочетания компонентов в составе топлива для дизельных двигателей и установок.

Практическая значимость исследования состоит в том, что в результате исследования разработан новый метод добавки ТВС в ДВС, получено обоснованное оптимальное содержание воды и водорода в ТВС для основных режимов работы дизельного двигателя, улучшаются экономические и экологические показатели ДВС.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 разделов, результатов и основных выводов, списка использованной литературы из 44 наименований, в т.ч. 7 на иностранном языке. Общий объем диссертации составляет 76 страниц и включает в себя 20 рисунков, 16 таблиц, 9 формул и 2 приложения на 12 страницах.

1. Анализ состояния вопроса и задачи исследований

1.1. Стационарные дизельные установки

Дизель – это двигатель внутреннего сгорания (ДВС), который работает на жидком топливе. Дизельные ДВС потребляют примерно на треть меньше горючего, чем бензиновые двигатели, поэтому получили широкое применение там, где требуется большой расход топлива, в том числе в стационарных электростанциях.

Стационарная дизельная электростанция представляет собой энергетическую установку, оборудованную несколькими мощными дизельными генераторами (рисунок 1). Принцип работы такой установки основан на вращении вала за счет энергии двигателя внутреннего сгорания [7].

На сегодняшний день область применения стационарных дизельных электростанций чрезвычайно широка. Их используют на промышленных предприятиях, строительных площадках, в сельском хозяйстве, для энергообеспечения коттеджных поселков, вахтовых городков, производств, то есть в тех сферах и направлениях, где есть необходимость в мощном источнике электропитания. Стационарные дизельные установки обеспечивают автономное питание и гарантированное электроснабжение. Они предназначены для работы в качестве постоянных или резервных источников электроэнергии, способных функционировать в течение длительного периода времени (от нескольких часов до нескольких суток, в зависимости от емкости топливного бака) [40].

Дизельные генераторы являются настолько производительными, надежными и универсальными устройствами, что совсем несложно понять, почему они получили такое широкое распространение.



Рисунок 1 – Стационарная дизельная электростанция в убежище гражданской обороны

Преимущества стационарных электростанций:

- высокая производительность
(стационарная дизельная электростанция способна работать в круглосуточном режиме 24/7, за счет мощных дизельных двигателей у нее отмечается высокий рабочий ресурс);
- легкий и быстрый запуск, простота конструкции;
- высокая экономичность
(дизельное топливо дешевле газа и бензина, а расход топлива дизельным двигателем гораздо ниже, в целом же по затратам на электроснабжение дизельная электростанция находится на одном уровне с ГЭС и ТЭС);
- безопасность эксплуатации
(дизельное топливо не выделяет горючих паров, как бензин и не взрывоопасно, как газ) [7].

Тем не менее, наряду со всеми имеющимися преимуществами, имеет место быть наличие недостатков стационарных дизельных установок,

которые сказываются не в пользу данного типа энергетических установок. К таковым относятся:

- высокий уровень шума (который раздается при работе установки);
- подготовка специальной площадки для монтажа, важность транспортировки;
- высокая стоимость топлива и большой его расход по причине круглосуточной работы установки.

Таким образом, для достижения цели по повышению эффективных показателей стационарных дизельных установок необходимо уделить внимание эффективному расходу топлива. Достичь такого эффекта предполагается возможным при помощи использования в ДВС топливно-воздушных и топливно-водных смесей.

Результаты исследований по применению топливно-воздушных и топливно-водных смесей для дизельных установок приведены в научных трудах как российских, так и зарубежных ученых. Но в то же время в этих трудах недостаточно полно освещены и исследованы те показатели дизельной установки, которые бы оценивали особенности ее работы при использовании рассматриваемых добавок к топливу. Помимо этого, те технические решения, которые известны науке на текущий момент, позволяют не в полной мере адаптировать дизельный двигатель к работе с использованием альтернативных добавок к топливу, рассматриваемых в данной работе. В связи с этим решение указанных вопросов требует теоретических и экспериментальных обоснований, подтверждаемых дальнейшими исследованиями.

1.2. Практика использования водорода в качестве добавки к дизельному топливу

Одним из преимущественных и особо перспективных источников в природе, который дает получить значительный объем энергии, является

водород (H₂). Запасы данного химического элемента на Земле практически безграничны. Широкое распространение в применении водорода в машиностроении связано с его высокими энергетическими и экологическими показателями и практически неограниченной сырьевой базой. Относительно дешевый водород можно получить электролизом воды, при разложении воды бактериями под действием солнечного света и из гидридов-металлов [32].

Молекулярный водород нетоксичен, не имеет вкуса и запаха, бесцветен, легко воспламеняется, горит бледно-голубым слабосветящимся пламенем. В воде водород растворяется слабо – 2% об. Один килограмм водорода содержит такое же количество энергии, как 2,1 кг природного газа или 2,8 кг бензина.

Одновременно с этим водород имеет весьма высокую удельную массовую теплоту сгорания (таблица 1), почти в три раза превышающую теплоту сгорания бензина [22].

Таблица 1 – Характеристики пожароопасности топлив

Свойство	Бензин	Метан	Водород
Плотность, кг/м ³	4,40	0,65	0,084
Коэффициент диффузии в воздухе, см ² /с	0,05	0,16	0,61
Пределы воспламенения, % к объему	1,0-7,6	5,3-15,0	4,0-75
Энергия воспламенения в воздухе, МДж	0,24	0,29	0,02
Температура воспламенения, °С	228-471	540	585
Температура пламени, °С	2197	1875	2045

Использовать водород как топливо возможно 3 путями:

- применение одного водорода в чистом виде;
- применение водорода вместе с обычным нефтяным топливом;
- применение водорода в качестве топлива в топливных элементах.

Добавка водорода повышает топливную экономичность двигателя. По физико-химическим и моторным свойствам водород резко отличается от

традиционных топлив. Поэтому предстоит еще значительная работа по организации рабочего процесса в многотопливных дизелях с применением водорода.

Во многих трудах ученых говорится о том, что большие перспективы имеет направление, в котором водород выступает как основное топливо, а также используется в качестве добавки или компонента в его составе [25]. Доказательством этому также служит тот факт, что такие развитые страны как Япония и Германия уже довольно давно и очень активно проводят исследования, внедряют новые разработки и выпускают научные труды по использованию водорода в двигателестроении. А в Соединенных Штатах Америки уже в 2006 году Департамент Энергетики одобрил и подписал план стратегического развития водородной энергетики «Дорожная карта по производственным исследованиям и разработкам для водородной экономики» [4].

Природные ресурсы углеводородного топлива имеют свойство истощаться. А требования к экологии постоянно ужесточаются. По этим причинам ученым и исследователям всего мира приходится постоянно прибегать к поиску новых, современных и доступных способов получения альтернативных видов топлива, а также эффективного их применения, в том числе и в двигателях.

В настоящее время особо широко применяются ДВС только с двумя типами воспламенения:

- с принудительным,
- от сжатия (дизельные).

В России отношение одного типа ДВС к другому – 40/60 [6]. В ДВС с принудительным воспламенением гомогенный способ смесеобразования, в дизельном – гетерогенный. Это является главным отличием ДВС. Влияние добавок, активизирующих процесс сгорания, во многом зависит от способа формирования топливно-воздушной смеси (ТВС). Конкретно для дизельных двигателей изучаются такие способы применения водорода, в которых

данный компонент может выступать в качестве обособленного топлива. В то же время не исключается возможность его использования как присадки или добавки к основному топливу [1]. В статье Д.А. Павлова [25] как раз обсуждается влияние такой добавки в ДВС. В данной статье исследуется добавление водорода в двигатель при разных способах использования ТВС.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- изучить, как на эффективные показатели двигателя влияют добавки водорода;
- установить, как на эффективные показатели двигателя влияют разные способы смесеобразования при добавлении водорода.

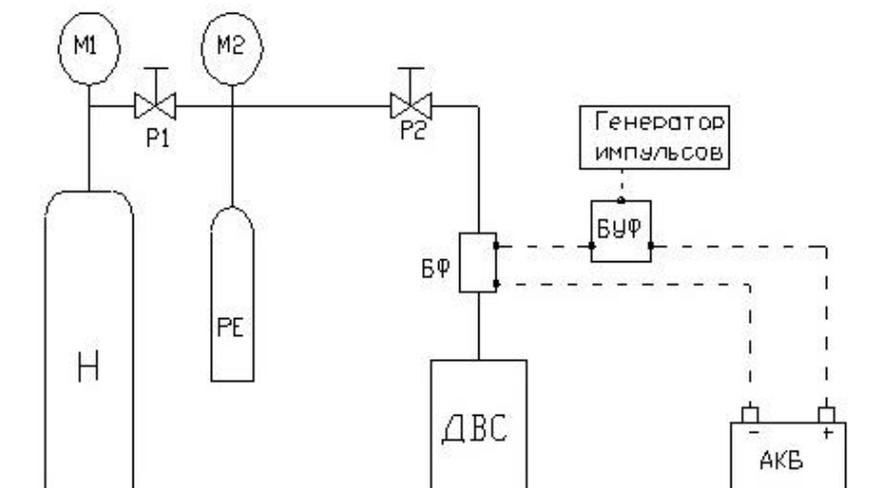
Методика исследований заключалась в следующем:

«Объектами исследования послужили двигатели производства ОАО «КамАЗ», которые реализуют два разных способа формирования топливно-воздушных смесей (ТВС) и работают на газовом и на дизельном топливе.

Объекты исследования:

1) поршневой, четырехтактный двигатель с искровым зажиганием и электронной системой управления КАМАЗ – 820.52-260	2) поршневой, четырехтактный дизельный двигатель КАМАЗ 740.62-280
рабочий объем $V_h = 11,76$ л	рабочий объем $V_h = 11,76$ л
степень сжатия $\varepsilon = 12$	степень сжатия $\varepsilon = 16,5$
номинальная мощность $N_e = 260$ кВт	номинальная мощность $N_e = 280$ кВт
частота вращения коленчатого вала $n = 2200$ мин ⁻¹	частота вращения коленчатого вала $n = 1900$ мин ⁻¹
предназначен для работы на сжатом природном газе	

В обоих случаях моторный стенд дополнительно оснащался типовой системой подачи водорода в ТВС» [25]. Система подачи водорода изображена на рисунке 2.



Н – баллон с водородом, М1-М2 – манометры, Р1-Р2 – редукторы, БФ – блок форсунок, РЕ – расходная емкость, БУФ – блок управления форсунками, АКБ – аккумуляторная батарея

Рисунок 2 – Система подачи водорода

«Эффективность применения водорода оценивалась путем сравнения различных характеристик, полученных как с добавкой водорода, так и без нее.

Характеристики ДВС на исследуемых режимах определялись в следующей последовательности: производился пуск двигателя при температуре, влажности и давлении окружающей среды, характерной для моторного бокса. Затем осуществлялся прогрев до рабочей температуры двигателя. После устанавливался исследуемый режим работы двигателя, и снималась исходная (базовая) характеристика. Далее во впускной коллектор двигателя подавался водород в необходимом количестве. После начала подачи водорода проводилась коррекция режима работы двигателя, и по достижению установившегося режима проводились соответствующие измерения» [25, с. 4].

Анализ результатов, проведенных исследований:

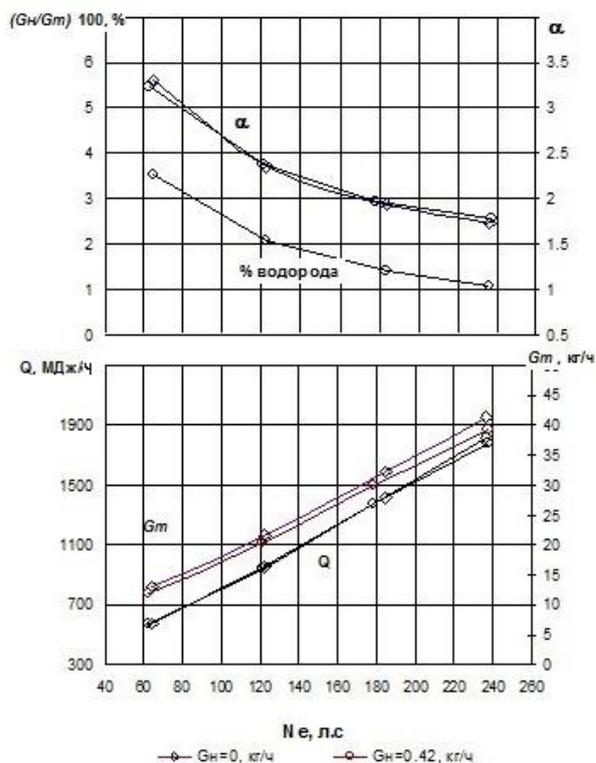


Рисунок 3 – Кол-во теплоты, подведенной к двигателю

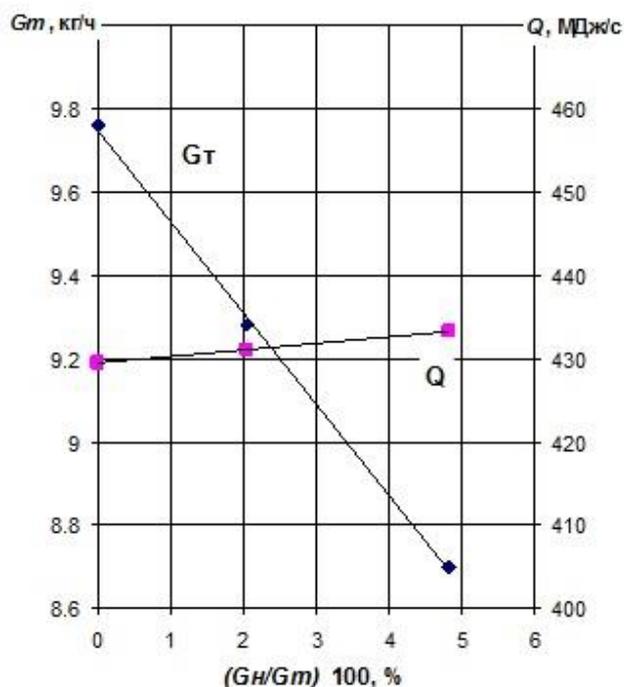


Рисунок 4 – Расход топлива и общего кол-ва теплоты, подведенной к двигателю

«На рисунке 3 представлены графики изменения количества теплоты (Q , МДж/с) подведенной к двигателю, как в случае использования добавки водорода, так и без нее. Из рисунков видно, что общее количество теплоты подведенного к двигателю на схожих режимах его работы во всех случаях практически одинаково. Расход дизельного топлива G_m при этом уменьшается пропорционально количеству водорода, добавляемого в двигатель. Для наглядности на рисунке 4 изображено изменение расхода топлива и общего количества теплоты, подведенной к двигателю в зависимости от процента добавки водорода. Первичный анализ результатов позволил установить, что расход дизельного топлива подчиняется следующей зависимости:

$$G_m^H = G_m - G_H (Hu_H / Hu_m), \quad (1)$$

где G_m^H – расход дизельного топлива при добавке водорода, кг/ч;

G_m – расход дизельного топлива без добавки водорода, кг/ч;

G_H – расход водорода, кг/ч;

H^U_H, H^U_T – низшие теплотворные способности водорода и дизельного топлива соответственно.

Представленная зависимость позволяет оценить расход топлива при использовании добавки водорода для дизельного двигателя с погрешностью 5%.

В ходе дальнейшего анализа было выявлено, что формула 1 не отражает результаты экспериментов для газового двигателя. На рисунках 5 и 6 представлены результаты расчета подведенного количества теплоты к ДВС работающего на природном газе с добавкой водорода» [25, с. 6].

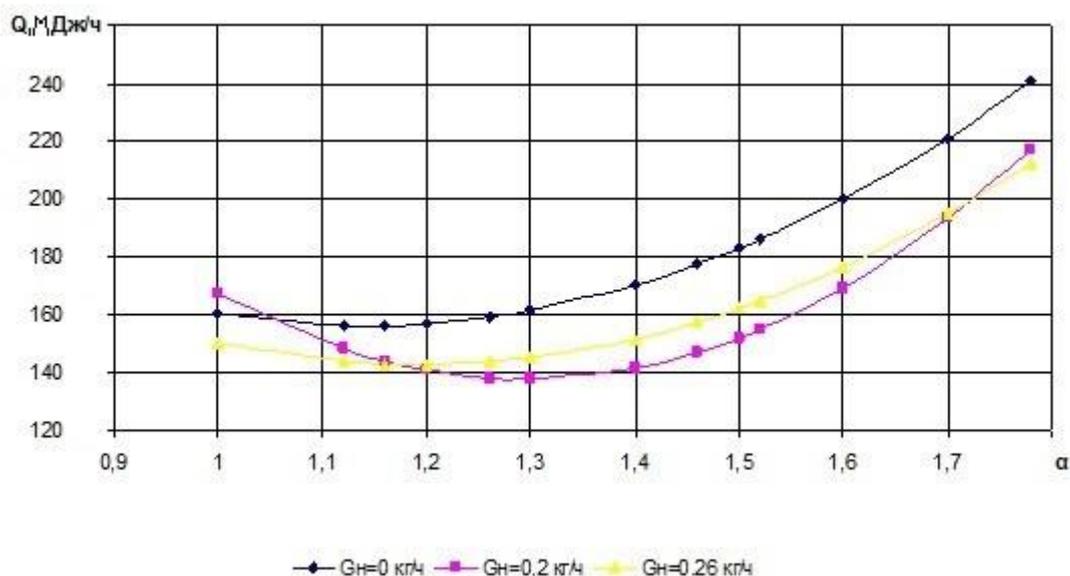


Рисунок 5 – Подведенное кол-во теплоты с метановодородной смесью (режим х/х)

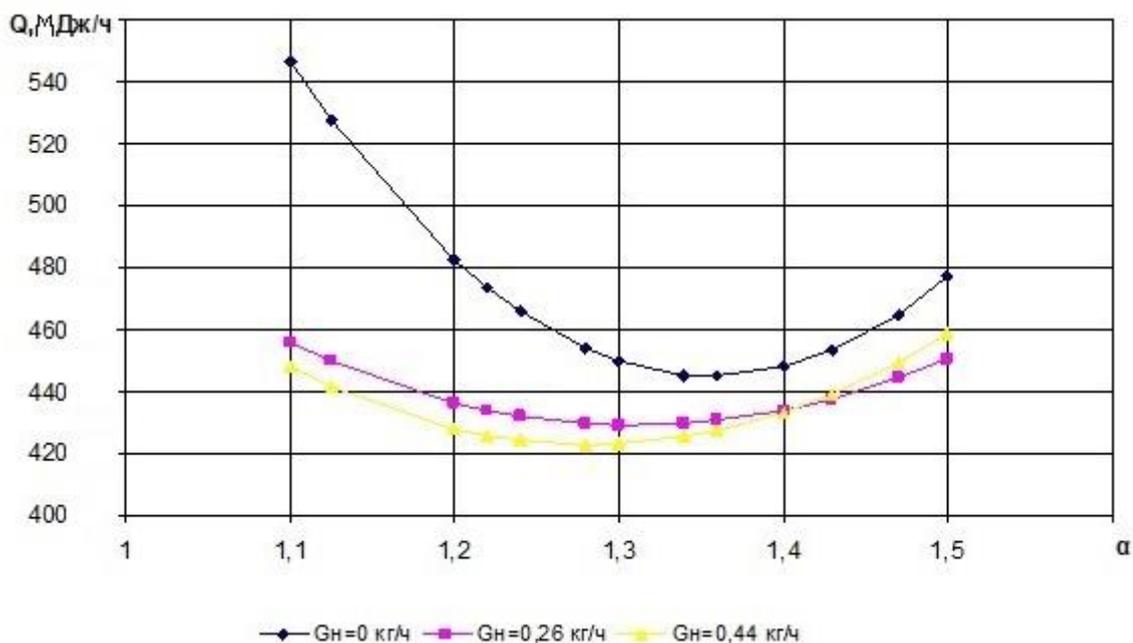


Рисунок 6 – Подведенное кол-во теплоты с метановодородной смесью

«Из графиков видно, что количество теплоты, подведенное со смесью газового топлива и водорода, по значению отличается от такового для чистого газового топлива. Это позволяет предположить наличие *эффекта более полного использования подведенной теплоты*. Что в свою очередь указывает на наличие активации горения, или промотирование.

Для обозначения этого эффекта была введена переменная k :

$$k = \frac{Q_{см}}{Q_T}, \quad (2)$$

где $Q_{см}$ – количество теплоты, подведенное в двигатель со смесью топлив,

Q_T – количество теплоты, подведенное в двигатель вместе с основным топливом при отсутствии добавок водорода.

Тогда формула 1 после некоторых преобразований будет выглядеть:

$$G_T^H = G_T \cdot k \cdot \frac{m \cdot H_T}{m \cdot Hu_T^H + (1 - m) \cdot Hu_H}, \quad (3)$$

где m – массовая доля топлива в смеси.

Предварительный анализ значений переменной k показал, что переменная имеет сложную функциональную зависимость от большого количества факторов, таких как расход водорода, состав смеси и режима работы двигателя. Поэтому целесообразно будет представить ее в форме эмпирической величины.

В целом по результатам работы сформулированы следующие выводы:

- получены и обработаны результаты исследования влияния добавок водородосодержащих газов на экономические показатели ДВС при разных способах смесеобразования;
- выявлена функциональная зависимость влияния добавок водорода от расхода водорода на экономические показатели двигателя;
- установленная закономерность позволяет учитывать способ формирования ТВС и эффективность применения водорода за счет присутствия в ней коэффициента k ;
- экспериментально установлено, что наибольший эффект добавка водорода оказывает на двигатели с гомогенным способом формирования ТВС» [23].

1.3. Исследование показателей дизельного двигателя при добавлении водорода

Действие добавок водорода на эффективные показатели дизельного топлива также рассматривалось в статье Л.Н. Бортникова и Д.А. Павлова [24].

Целью работы ставилось изучить влияние добавок водорода на основные показатели дизельного двигателя. Исследования проводились в

условиях моторного стенда. Рассматриваемый двигатель реализовывал гетерогенное горение, т.е. относился к типу дизельных. Задачи проводимой работы заключались в следующем:

- рассчитать такое количество добавок водорода, чтобы достигнуть результатов, при которых будет происходить снижение удельного расхода топлива;
- выявить необходимое количество для улучшения экологических показателей дизеля [23].

На основании проведенных испытаний были получены следующие результаты:

«Влияние добавки водорода на мощностные показатели дизельного двигателя:

Для оценки влияния водорода на мощностные характеристики были сняты *условные внешние скоростные характеристики (УВСХ)* двигателя без добавки водорода и с максимальной возможной подачей водорода (рисунок 7).

Из рисунка 7 можно увидеть, что при добавке водорода мощность двигателя N_e практически не меняется.

Влияние добавки водорода на экономические показатели дизельного двигателя:

Экономичность двигателя определяется степенью эффективного использования подведенной с топливом теплоты, и количественно может быть оценена величиной удельного эффективного расхода топлива:

$$g_e = G_m/N_e \quad (4)$$

где G_m – расход топлива, кг/ч;

N_e – эффективная мощность двигателя, л.с. (кВт).

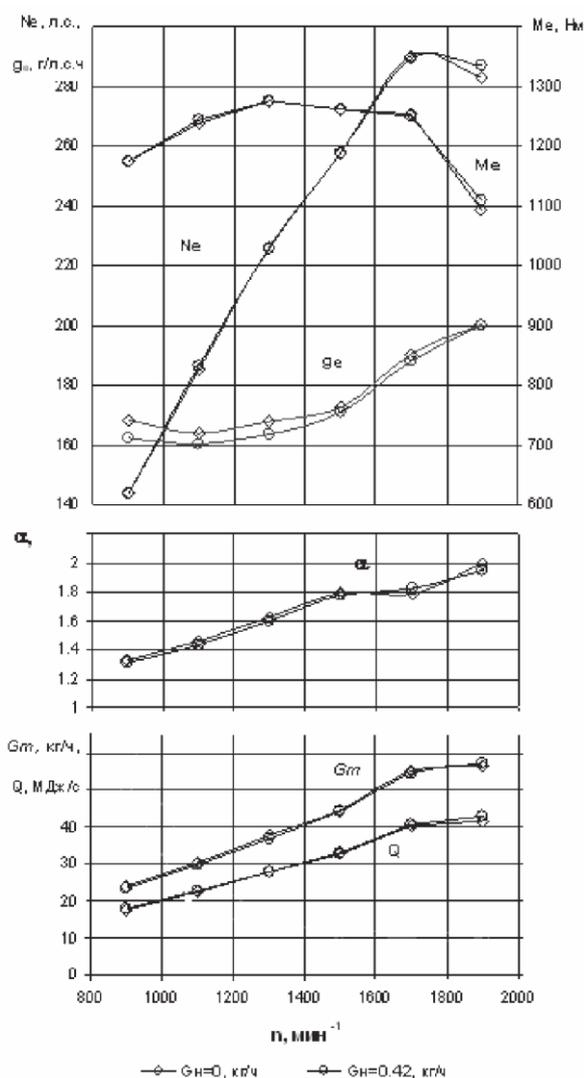


Рисунок 7 – УВСХ двигателя КАМАЗ 740.62- 280

Однако использовать указанную величину удельного эффективного расхода топлива в качестве критерия оценки экономичности при добавке водорода в двигатель не корректно, так как при добавке водорода изменяются теплофизические свойства топлива (рабочей смеси) [14]. Поэтому оценка экономических параметров двигателя при добавке водорода проводилась по двум параметрам: Q , МДж/с – общее количество тепла, поступившее в цилиндры двигателя с дизельным топливом и водородом в единицу времени, и η_e – эффективным КПД двигателя.

На рисунке 8 представлено изменение расхода топлива и общего количества теплоты, подведенной к двигателю, в зависимости от количества добавки

водорода (в процентах). Некоторое увеличение величины Q обусловлено погрешностями измерений.

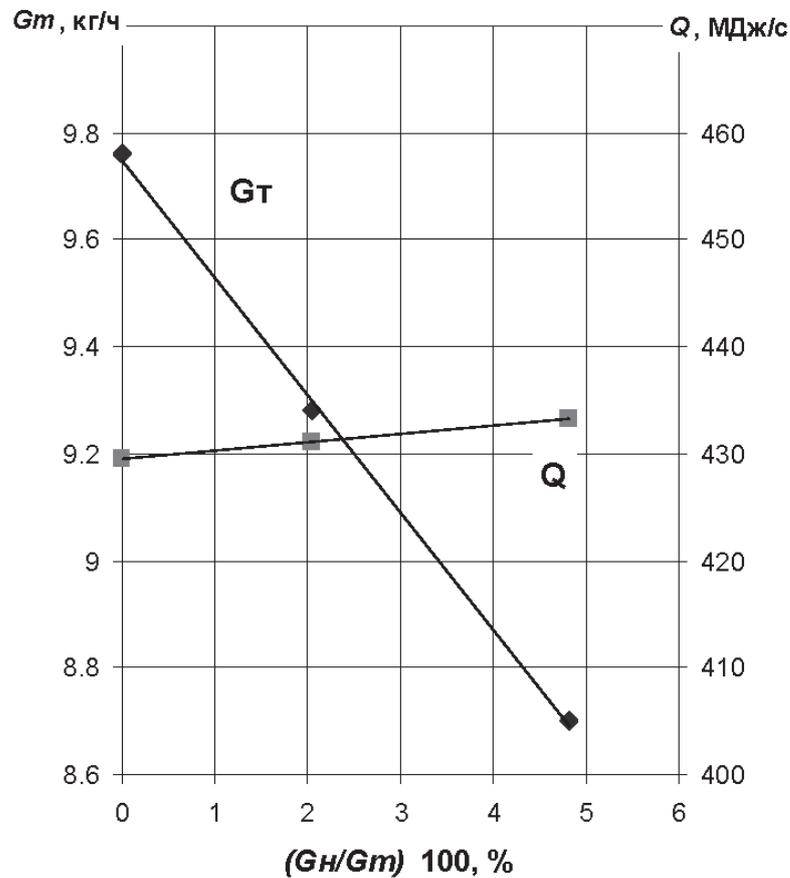


Рисунок 8 – Изменение G_m и Q в зависимости от процента добавки водорода ($N_e = 42$ л.с., $n = 1180$ мин⁻¹)

Дальнейший анализ результатов экспериментов позволил установить, что расход дизельного топлива также подчиняется зависимости» [14] (формула 1):

$$G_m^H = G_m - G_H (Hu_H / Hu_m).$$

Проведенные исследования выявили, что на тех режимах, которые рассматривались при данном анализе, добавление водорода мало влияет на КПД дизеля. На рисунке 9 изображен график изменения эффективного КПД дизеля с учетом измерений при его работе на разных режимах.

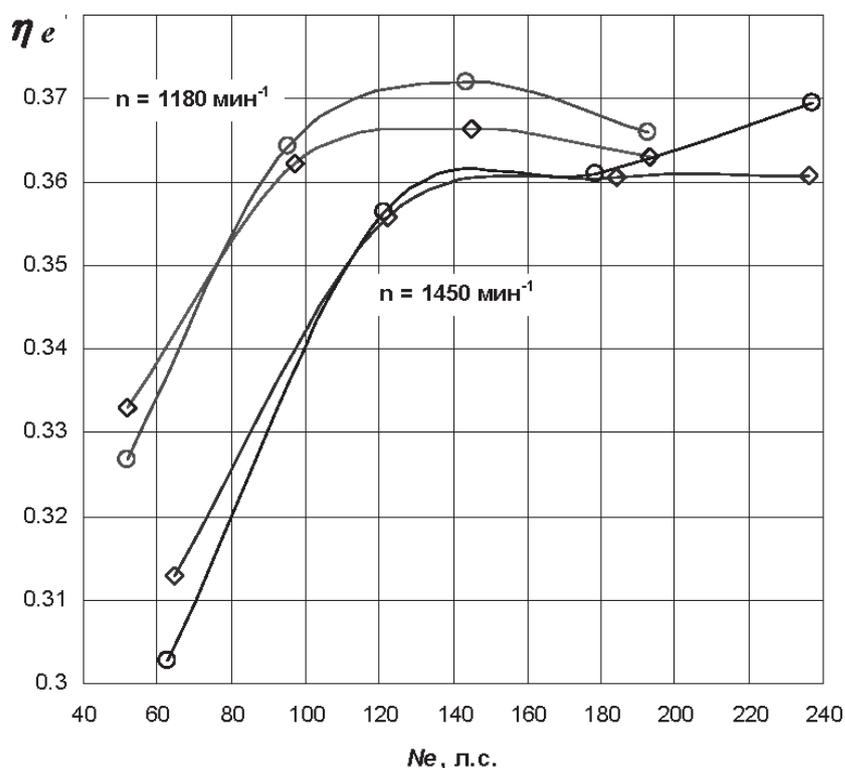


Рисунок 9 – КПД двигателя на разных режимах работы

На основании проведенного исследования были сделаны следующие заключения о влиянии добавки водорода на экономические показатели дизеля и его мощностные характеристики:

- водород, в том количестве, который приняли его расход, положительно сказывается на мощности дизеля, не ухудшая ее;
- малозначительно влияет на эффективный КПД двигателя;
- значительно уменьшает выбросы углеводородов до 40%;
- расход дизельного топлива можно рассчитать, используя зависимость из формулы 1. Благодаря полученной формуле представляется возможным осуществлять расчет расхода топлива при использовании добавки водорода с погрешностью 5%.

Тем не менее, при значительных достоинствах, которые выявлены при использовании водорода в дизельных двигателях, до сих пор его применение в двигателестроении создает значительные трудности. На сегодняшний день водород массово не используется как топливо. Основная причина

заключается в том, что для производства водорода в требуемом объеме (в качестве топлива) отсутствует инфраструктура для его масштабного применения в промышленности.

Главной проблемой в применении водородного топлива являются затраты электричества на выделение чистого вещества. Эти затраты превышают количество энергии, получаемое от сжигания водорода. Так как водород сложно получить в больших количествах, то появляется необходимость в разработке и оснащении двигателя специальной установкой закрытого типа – электролизером, отвечающим за расщепление воды и позволяющим добыть водород. Но на практике такая установка сложна в изготовлении, а максимальный КПД электролизера достигает 50% [29]. К тому же стоимость чистого водорода на порядок больше обычного топлива, что в свою очередь сдерживает развитие водородной энергетики.

Из-за высокой температуры сжатия водород легко вступает в реакцию с различными металлическими элементами силовой установки, в том числе и с моторным маслом. По этой причине необходимо найти такое сочетание компонентов топливной смеси, в котором водород будет находиться в малых количествах, но при этом не будет нанесен ущерб энергоемкости процесса сгорания.

1.4. Применение водородосодержащих газообразных веществ (на примере метанола)

В последние годы наблюдается значительный рост интереса к газообразному топливу. Их доля в мировом энергетическом балансе скоро превысит 21% от общего объема произведенной энергии. Это связано с тем, что независимо от типа газа и применяемой технологии сжигания они позволяют значительно снизить токсичные выбросы. С другой стороны, очень высокая доступность (залежи природного газа, сланцевого газа, способность получать биометан из органических веществ, синтез-газ и угольный газ в промышленных процессах) и низкая цена приводят к тому, что в ближайшие годы

газообразное топливо будет значительно увеличиваться, диверсифицировать все энергетические отрасли [38].

В настоящее время во многих исследовательских центрах разрабатывается концепция питания ДВС газообразным топливом в двухтопливном режиме. Относительно небольшая доза жидкого топлива, впрыскиваемая в цилиндр, действует как ингибитор воспламенения и стабилизирует сгорание газообразного топлива, которое обеспечивает большую часть энергии. Как и в случае монорежима, газовое топливо, подаваемое в двигатель, может меняться. Адаптация к изменениям в составе топлива достигается путем регулирования параметров впрыска топлива начальной дозировки и многих других регулируемых параметров, таких как количество и температура воздуха, рециркуляция выхлопных газов и т.д.

Правильно спроектированный ДВС со сложными алгоритмами регулирования можно по существу назвать многотопливным двигателем, который по необходимости может работать в любое время с любым жидким или газообразным топливом.

Газообразное топливо для двигателей внутреннего сгорания

Некоторые свойства горючих газов, которые являются основными составляющими газообразного топлива, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Основные свойства отдельных компонентов газообразного топлива

Компонент	Теплотворная способность [МДж/м ³]	Плотность при нормальных условиях [кг/м ³]	Нижний предел воспламенения (% газа в воздухе)	Верхний предел воспламенения (% газа в воздухе)	Скорость сгорания [м/с]	Температура самовоспламенения [К]	Теоретический расход воздуха [м ³ /м ³]
Водород Н ₂	10,78	0,0899	4	75	0,302	807	2,38
Метан СН ₄	35,89	0,717	5	15	0,338-0,67	923	9,54

Продолжение таблицы 2

Компонент	Теплотворная способность [МДж/м ³]	Плотность при нормальных условиях [кг/м ³]	Нижний предел воспламенения (% газа в воздухе)	Верхний предел воспламенения (% газа в воздухе)	Скорость сгорания [м/с]	Температура самовоспламенения [К]	Теоретический расход воздуха [м ³ /м ³]
Этан С ₂ Н ₆	63,77	1,34	3	12,4	0,43-0,856	793	16,7
Пропан С ₃ Н ₈	91,28	1,97	2,1	9,5	0,384-0,821	783	23,8
Углерод монооксид СО	12,6	1,25	12,5	74	0,024	881	2,38
Сульфид водорода Н-S		1,54	4,3	45	-	563	7,14

Из всех вышеупомянутых горючих газов только метан является ископаемым газом. Остальные газы получают в результате обработки минералов или в результате естественных процессов.

Также в настоящее время в качестве альтернативного топлива в различных областях используется метанол. Его испытания были продемонстрированы в начале девяностых годов. Он состоит из угля, биомассы и возобновляемого источника энергии за счет улавливания углерода и схемы его использования. Это жизнеспособное топливо, имеющее большой потенциал для сокращения углеродного следа ископаемого топлива в транспортном секторе. Он используется в качестве топливной смеси или в чистом виде в ДВС. Таким образом, метанол является наиболее привлекательным топливом в качестве альтернативы обычному топливу, поскольку он обладает такими качествами, как получение жидкого топлива, простота хранения и распределения.

Применение метанола в двигателе внутреннего сгорания увеличивает тепловую эффективность, следовательно, увеличивает использование энергии. Он производит больше углеводородов и снижает выбросы оксидов углерода и сажи в выхлопных газах, чем обычное топливо. Таким образом,

он имеет такие преимущества, как устойчивость, энергетическая безопасность и качество воздуха.

Химическая структура метанола (CH_3OH) содержит кислород, который отделяется от обычного топлива и вызывает износ, разрушение и коррозию компонентов двигателя. Поэтому компоненты двигателя, контактирующие с топливом, необходимо модернизировать. Поскольку текущая цена на топливо растет с каждым днем, ее необходимо снижать, применяя другое топливо без изменения эксплуатационных затрат. Детали двигателя (топливный насос, клапаны двигателя, седла клапанов двигателя, топливо и масляные уплотнения) контактируют с метанолом.

Металлы и эластомеры, используемые в топливных системах, подвергаются воздействию метанола, если не будет правильно подобран материал. Среди спиртов метанол наиболее агрессивен. Метанол и влажный метанол вызывают коррозию железа, стали, магния, алюминия, цинка, меди и их сплавов.

Для защиты металлических поверхностей применяют анодирование. Это электрохимический процесс, при котором металлические поверхности превращаются в анодный оксид, а он в свою очередь является коррозионностойким и очень прочным. Таким образом, эти покрытия можно использовать для двигателей, работающих на метаноле.

На основании рассмотренных трудов можно сделать вывод, что применение в дизельных двигателях метанола (как водородосодержащий газовый компонент) в качестве добавки к основному топливу позволяет решить проблему с экологической и экономической стороны. Принимая во внимание тот факт, что запасы нефтяного топлива постоянно сокращаются, а цены на него растут, то появляется альтернативная замена традиционного топлива на продукты сырья растительного происхождения, в том числе, и метанола. Единственно, существенным недостатком данного вида топлива является его довольно высокая летучесть и ядовитость.

1.5. Применение в дизельных двигателях спиртового топлива (на примере этанола)

Альтернативные виды топлива заменяют традиционный источник энергии в глобальных перспективах двигателей. Спирты являются альтернативным возобновляемым источником энергии, который привел к полномасштабной эволюции и внедрению в качестве топлива в двигателе, который может работать с разным процентным содержанием. Среди альтернативных видов топлива биотопливо – один из примеров такого развития в мировом сценарии [37].

Спиртовой двигатель – это двигатель внутреннего сгорания, который может работать с различным процентным содержанием метанола или этанола, и топливо может храниться в одном баке. Эти двигатели могут сжигать любую фракцию спирта с обычным топливом, используя управление синхронизацией впрыска топлива, то есть, изменяя стратегии и методы впрыска. Этим во многом объясняется привлекательность использования данного вида топлива в энергетическом машиностроении.

Однако спирты, контактирующие с черными металлами, вызывают большую коррозию, чем обычное топливо. Обычно коррозия возникает из-за примесей, таких как муравьиная кислота, уксусная кислота и хлориды. Загрязняющие вещества, такие как хлорид-ион, муравьиная кислота, присутствующая в спиртах, вызывают усиленную коррозию. Этилацетат, уксусная кислота и ион хлорида вместе более подвержены коррозии, чем один из них. Образование муравьиной кислоты и уксусной кислоты в спиртовом топливе является обычным явлением во время горения и усиливает их коррозионную активность. Метанол или этанол, абсорбирующие воду, делают их электропроводными, а любые загрязнения, содержащие ионы, увеличивают их проводимость, что усиливает электрохимическую и гальваническую коррозию.

Этанол и абсорбированная вода увеличивают электропроводность спирта, что приводит к усилению коррозии. Муравьиная кислота – это продукт сгорания спирта, который снижает температуру коррозии ниже точки росы выхлопных газов двигателя. Такие металлы, как магний, алюминий и свинец, более подвержены воздействию спирта, вызывающего коррозию. Загрязнения в спиртовом топливе усиливают коррозию системы обращения с топливом, а также вызывают коррозию продуктов сгорания. Основным результатом коррозии является гидратированный хлорид железа, который усиливает образование ржавчины.

Также спирты, используемые в качестве альтернативного топлива, вызывают износ металлических компонентов. Износ компонентов двигателя является серьезной проблемой. Были проведены многочисленные исследования, чтобы изучить их чувствительность. Применение метанола в качестве топлива в двигателе внутреннего сгорания увеличивает износ компонентов двигателя. Это связано с образованием продуктов сгорания, вызывающих коррозию, что приводит к уменьшению толщины масляных пленок. Промежуточный продукт сгорания, такой как муравьиная кислота, способствует износу гильзы цилиндра двигателя и узла поршневых колец. Коррозия поршневого кольца и толкателя кулачка при применении 15% смеси этанола с обычным топливом вызывает значительный износ.

В работе авторов [19] анализируются свойства спиртов, которые можно использовать в качестве моторных топлив и различные способы работы дизельных двигателей при использовании спиртовых топлив (в частности этанола). «Некоторые свойства данных спиртов сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Физико-химические свойства спиртов (простейших)

Показатель	Метанол	Этанол	<i>n</i> -пропанол	Изопропанол	<i>n</i> -бутанол	<i>Втор</i> -бутанол	<i>Трет</i> -бутанол	Изобутанол
Формула состава	CH ₃ OH	C ₂ H ₅ OH	C ₃ H ₇ OH	C ₃ H ₇ OH	C ₄ H ₉ OH			
Молекулярная масса	32,04	46,07	60,10	60,10	74,12	74,12	74,12	74,12
Плотность при 20°C, кг/м ³	791,7	789,0	803,5	785,1	809,8	806,0	788,7	802,1

Продолжение таблицы 3

Показатель	Метанол	Этанол	<i>n</i> -пропанол	Изопропанол	<i>n</i> -бутанол	<i>Втор-</i> бутанол	<i>Трет-</i> бутанол	Изобутанол
Кинематическая вязкость при 20°C, мм ² /с	0,75	1,00	2,81	3,09	3,60	5,22	4,20	4,50
Коэффициент поверхностного натяжения при 20°C, мН/м	22,1	22,0	23,8	21,7	24,2	23,0	—	22,1
Цетановое число	5	8	—	—	18	—	15	—
Октановое число по моторному методу	98	99	—	90	87	—	95	94
Октановое число по исследовательскому методу	112	111	—	110	—	112	—	113
Температура плавления, °С	-97,8	-114,6	-126,2	-89,5	-89,8	-114,7	25,5	-108,0
Температура кипения, °С	64,7	78,4	97,2	82,4	117,5	99,5	82,9	108,4
Критическая температура, °С	249,4	243,7	263,7	235,6	288,6	264,0	235,0	271,0
Критическое давление, МПа	8,02	6,38	5,10	5,38	4,68	4,53	4,96	4,58
Температура вспышки, °С	10,0	12,2	23,0	13,0	34,0	24,0	10,0	28,0
Температура самовоспламенения, °С	464	426	371	—	345	—	480	390
Концентрационные пределы воспламенения, %	6,7-36,5	3,2-19,0	2,1-13,5	2,2-13,0	1,8-12,0	1,9-7,9	—	1,8-7,3
Нижшая теплота сгорания, кДж/кг	19 670	26 800	30 700	32 800	33 100	—	—	32 980
Количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг вещества, кг	6,49	9,01	10,36	10,36	11,20	11,20	11,20	11,20
Теплота испарения, кДж/кг	1115	870	749	670	591,2	562,4	535,4	578,4
Давление насыщенных паров при 0,1 МПа и 20°C, кПа	24,6	12,2	2,0	5,2	0,8	2,4	5,6	1,2
Теплоемкость C_p при 0,1 МПа и 20°C, кДж/(кг·град)	2,51	2,47	2,45	2,68	2,43	2,73	—	2,38
Массовая доля, %								
С	37,5	52,2	60,0	60,0	64,8	64,8	64,8	64,8
Н	12,6	13,1	13,4	13,4	13,6	13,6	13,6	13,6
О	49,9	34,7	26,6	26,6	21,6	21,6	21,6	21,6
Растворимость в воде при 20°C, г/100 г воды	Не ограничена		Хорошая	Хорошая	10,0	12,5	Не ограничена	11,1
Предельно допустимая концентрация в воздухе рабочей зоны, мг/м ³	5	1000	10	980	10	150	300	150» [17].

Согласно таблице 3 из всех рассматриваемых спиртов для использования в ДВС больше всего подходит этанол за счет своих хороших экономических и экологических качеств: обладает возможностью получения из различного сырья и имеет наивысшую предельно допустимую концентрацию в воздухе при работе двигателя.

Исследования авторов [19] показывают, что в дизелях использование спиртовых топлив приводит к повышению экономичности. Но отрицательной стороной применения данного спирта в качестве топлива является тот факт, что этанол имеет низкую плотность и вязкость. Из-за этого происходит самовоспламенение спирта в КС дизеля. А это может вызвать серьезные проблемы.

В таблице 4 приведен сравнительный анализ свойств дизельного топлива и этилового спирта.

Таблица 4 – Свойства и состав топлив

Топливо	Массовые доли				Низшая теплота сгорания H_U , кДж/кг	Стехиометрическое соотношение l_o , кг/кг	Плотность ρ_T , кг/м ³
	углерод	водород	кислород	сера			
Дизельное топливо	0,87	0,126	0,004	0,005	42 500	14,3	840
Этиловый спирт	0,521	0,132	0,347	0	27 500	9,0	790

Также проблемой использования этанола в качестве топлива является его достаточно низкая эмульгированность с дизельным топливом и со многими альтернативными топливами [34]. Главная причина, по которой происходит плохая смешиваемость – это наличие в составе этанола воды, а вода, как известно плохо смешивается с маслянистыми нефтяными продуктами.

1.6. Влияние воды на характеристики дизельного топлива

Один из основных путей улучшения эксплуатационных свойств дизельных ДВС (в том числе свойств экономических и экологических) – это применение воды в качестве компонента к основным нефтяным и дизельным топливам. Многочисленные исследования подтвердили, что вода, используемая в составе топливно-водных смесей, позволяет значительно уменьшить концентрацию оксида углерода (СО) и оксидов азота (NO_x) в отработавших газах, снизить возможность детонационного сгорания, а также существенно повысить экономичность двигателя, а в нашем случае и дизельных установок в целом.

В настоящее время большое распространение получили такие установки, в основу работы которых положен принцип насыщения водой топливных систем. Многочисленные работы инженеров уже не один раз доказывали, что использование топливных эмульсий на основе воды отличаются своей эффективностью. Из достоинств новых силовых установок можно выделить основные:

- уменьшается расход топлива,
- очищается от сажи камера сгорания,
- понижается выброс в атмосферу ядовитых, а также отравляющих элементов отработавших газов.

Ввиду того, что благодаря таким добавкам топливо становится насыщенным водой, предоставляется возможность использовать более современные и эффективные присадки, которые способны растворяться в воде [2].

Многочисленные исследования подтверждают, что применение водотопливных эмульсий приводит к улучшению многих показателей дизеля. К ним относятся:

- снижение теплонапряженности металлических деталей дизеля (при том, что мощность самого двигателя остается неизменной);

- существенное уменьшение нагара в цилиндрах;
- снижение выброса сажи и оксидов азота в окружающую среду;
- уменьшение расхода топлива и смазочного материала.

Но в то же время, имея многочисленные подтверждения об эффективности водотопливных эмульсий, известно, что на сегодняшний день способы использования воды как присадки к топливу разработаны и изучены недостаточно обширно [33].

Свойства воды для получения водотопливной эмульсии

В последнее время многие дизельные установки уже используют в своей работе водотопливные смеси. Можно наблюдать, что качество воды, используемой в таких смесях, оказывает значительное воздействие на износ деталей топливных узлов и деталей двигателя. Особо такой эффект заметен на сернистых топливах. После их работы выделяются водяные пары. Эти пары вместе с серой создают сернистую кислоту и серную кислоту на стенках камеры сгорания. Параллельно с этим образуется накипь, а коррозия переходит из химического типа в электрохимический. Поэтому для получения водотопливной смеси необходимо, чтобы в воде отсутствовали соли общей жесткости, а также абсолютно не проявлялась активность коррозии. Чтобы соблюдались эти условия, вода для водотопливной эмульсии должна проходить определенную подготовку. К таковым относятся озонирование и электрохимическая обработка.

При озонировании происходит образование атомарного кислорода:

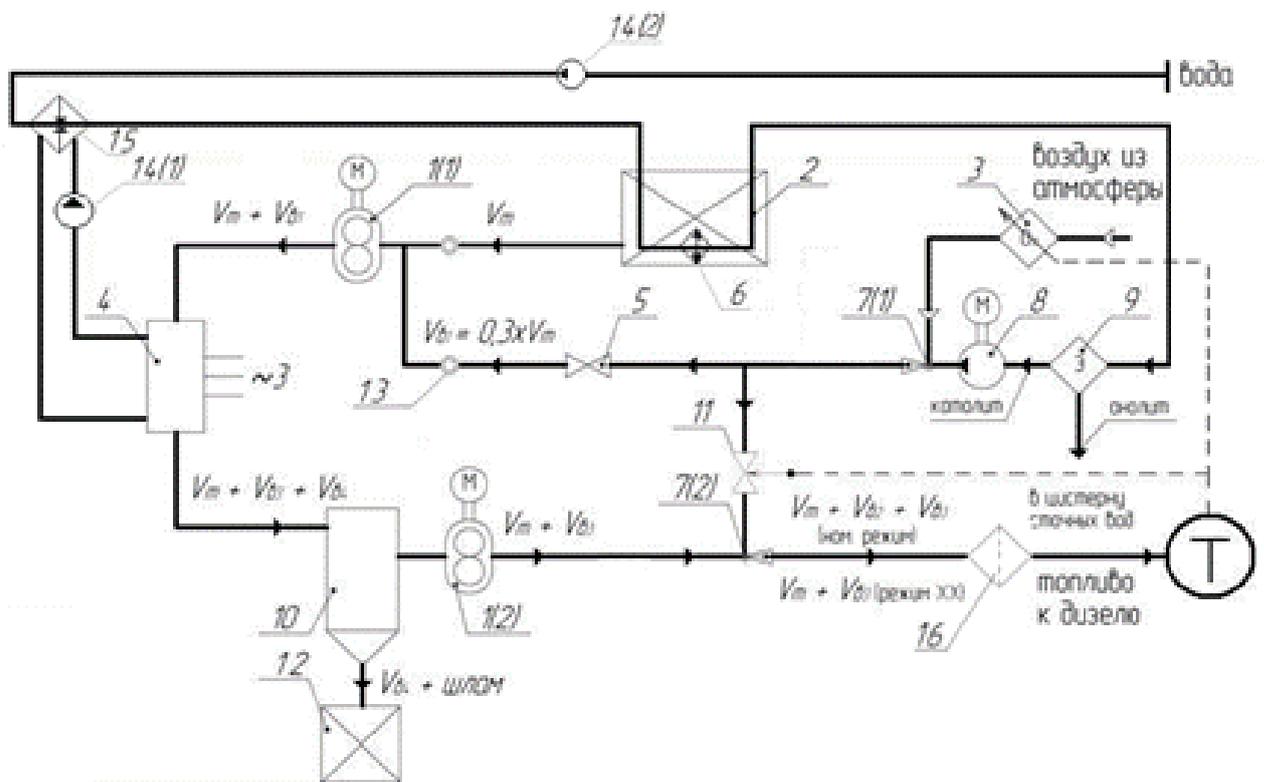


Это в свою очередь совершенствует эффект детонации и к тому же сгорание дизельного топлива происходит более полноценно, благодаря чему и улучшаются показатели касаемые загрязнения окружающей среды.

Но использование озона с целью извлечь позитивный опыт потребует формирования в дизеле значительного его сосредоточения. По этой причине

способ озонирования представляется экономически неразумным, так как постоянно возникает необходимость в повышении доз озона [2].

Более разумными стоит рассматривать такие концепции применения водотопливных смесей, в каких используются групповые технологические процессы. Т.е. перед смешением происходит обработка и топлива, и воды. Так группа авторов [2] разработала систему, которая осуществляет подготовку дизельного топлива (рисунок 10). Главным элементов этой системы выступает специальный аппарат, в котором происходит смешивание воды с топливом. Он получил название – аппарат вихревого слоя.



1 – насосы шестеренные; 2 – емкость исходного топлива; 3 – озонатор; 4 – аппарат вихревого слоя; 5 – клапан запорный; 6 – нагреватель; 7 – эжекторы; 8 – насос центробежный; 9 – электролизер; 10 – гидроциклон; 11 – клапан регулирующий; 12 – емкость для сбора шлама; 13 – расходомеры; 14 – насосы циркуляционные; 15 – теплообменник водомасляный; 16 – топливный фильтр тонкой очистки.

Рисунок 10 – Схема установки подготовки топлива для дизелей

Использование такого аппарата показало плюсы его работы:

- введение воды в основное топливо достигает цифры в 7%. Стоит заметить, что при этом компоненты смешиваются на уровне молекул, т.к. при детальном рассмотрении было отмечено отсутствие глобул воды;
- большой период хранения полученного топлива. Отмечено, что даже в течение 5-6 месяцев расслоения не обнаружено.

А также из преимуществ необходимо выделить следующее:

- «очистка топлива от нежелательных компонентов: от серы на 60-70% и от смолистых соединений на 80-90%;
- высокая стабильность водотопливных эмульсий (отсутствие расслоения в течение продолжительного времени);
- более полное сгорание топлива;
- снижение расхода топлива на 4-6%;
- снижение выбросов токсичных составляющих с отработавшими газами NO_x – в 2-2,5 раза, CO – 1,5-2 раза, также наблюдается снижение температуры отработавших газов и количества твердых частиц;
- расширение ассортимента применяемых сортов топлива для дизелей (использование низкосортных топлив, например, с высоким содержанием серы);
- доступность и низкая стоимость расходного материала (воды) для производства водотопливной эмульсии;
- малая энергоемкость» [2].

Также рассматривались и более ранние исследования российских инженеров и ученых. В этих работах показано, что «при добавлении 17% воды к топливу, количество оксида углерода (CO) снижалось на 50%, а оксидов азота (NO_x) – на 20%. При этом топливная экономичность достигала 5%» [17].

Зарубежными учеными из США издан ряд трудов о тестировании дизельных двигателей на основе водной эмульсии: «дизельное топливо – 80%, вода – 19,3% и эмульгатор – 0,7%. При такой топливной смеси кроме снижения вредных выбросов в отработанных газах была достигнута экономия чистого топлива до 8%» [42].

Кроме того, водотопливную смесь исследовали на ключевые физические качества и снимались свойства проб: плотность, вязкость, количество воды в остатке, температура, при которой начинается кристаллизация жидкости [20]. Проанализированные данные внесены в таблицу 5.

Исследование показало, что топливные физические показатели мало изменяет присадка воды в небольшом объеме. Все снятые характеристики, полученного в результате проведенной работы топлива, отвечают требованиям ГОСТ 305-82 «Топливо дизельное. Технические условия» [9].

Таблица 5 – Физические свойства проб

№ пробы	1	6	10	14
Плотность, г/см ³	0,825	0,830	0,828	0,825
Кинематическая вязкость, мм ² /с	3,2698	3,5226	3,4350	3,3575
Температура начала кристаллизации, °С	- 21,6	- 20,8	- 21,0	- 21,5
Остаточное содержание воды	-	2,0%	0,9%	0,4%
Остаточное содержание воды спустя 48 часов	-	0%	0%	0%

Результаты и выводы авторов, исследовавших процесс добавления водотопливной эмульсии в дизель, показали следующее:

при незначительном добавлении воды в пределах, не превышающих 2% от общего объема топливной смеси, практически не происходит изменений в физических показателях топлива. Поэтому, если установить, что расход топлива сократится, то будет достигнута и экономическая выгода. Но в тоже время, если пытаться достигнуть более высоких показателей качества

топлива, то необходимо вносить уточнения и создавать систему с более точными характеристиками [20].

Для того чтобы процесс сгорания топлива на основе углеводорода происходил лучше, создано большое количество разных способов. Но все они в основной своей массе направлены на изменение физико-химических свойств самого топлива. Такого результата добиваются благодаря применению специальных добавок и присадок, обработыванием топлива в специальных устройствах-катализаторах, электрооблучением топлива и многое другое. При выборе того или иного метода ключевым моментом является определение стоимости, а также энергоемкость способа. И, тем не менее, на данный момент более доступным и доходным с точки зрения экономики все же остается способ насыщения топлива водой, перед тем как оно попадает в двигатель [20].

Согласно большинству аспектов, в зависимости от особенностей процессов смесеобразования меняются и экономические характеристики дизелей, и их токсические показатели. Данное утверждение также рассматривалось в работе автора [33]. Согласно проведенным исследованиям улучшение экономических и экологических показателей требует улучшения качества смесеобразования и сгорания.

Однако использование воды в качестве компонента к дизельным топливам имеет и ряд недостатков, выявленных в работе [33]:

- прежде всего, это низкая стабильность эмульсий и отсутствие возможности быстрого изменения состава ТВС, отвод теплоты на испарение присадки и нагрев пара;
- сложность применения компонента при отрицательных температурах и зачастую значительное усложнение конструкции двигателя.

В ходе работы получен ряд конкретных результатов:

«1. Получена оптимальная величина присадки воды, подаваемой опытной топливной аппаратурой, по нагрузочной характеристике. На малых

нагрузках целесообразна работа на чистом дизельном топливе, а далее с увеличением нагрузки необходим рост величины присадки воды к топливу примерно до 30%.

2. При использовании присадки воды к дизельному топливу достигнуто снижение удельного расхода топлива на 4,5%, выбросов сажи с отработавших газов – на 25,45% и окислов азота – на 30% при некотором увеличении жесткости работы дизеля (до 5%). Прослеживается возможность дальнейшего форсирования двигателя по нагрузке без ухудшения показателей экономичности и токсичности» [33].

По результатам работы [33] были даны следующие рекомендации:

«1. Использовать опыт проведения математического моделирования показателей цикла дизеля, индикаторного КПД и его составляющих при использовании присадки воды к рабочему телу.

2. Применять разработанную топливную систему для приготовления, подачи и оперативного управления составом водотопливной эмульсии с целью интенсификации процессов смесеобразования и сгорания» [26].

Выводы по разделу 1:

Изучив и проанализировав по рассматриваемой теме многочисленные труды и научную литературу, как русских, так и зарубежных авторов, можно сделать вывод о том, что в настоящий момент тема разработки альтернативного топлива и добавок к нему для дизельных установок является насущной и очень актуальной. В свете развивающейся отрасли двигателестроения предоставляется возможным заменить действующие разработанные способы и устройства на более улучшенные и современные модели, т.к. использование в топливе альтернативных добавок может помочь в решении вопросов по уменьшению токсичности отработавших газов, улучшению экологических показателей, а также повышению экономических характеристик.

На основании проведенного анализа стало очевидно, что существует необходимость в изменении и модернизации имеющихся топливных добавок, выявлена степень значимости и верное направление данной работы.

На основании рассмотренных способов в многочисленных работах отмечаем, что единого способа по улучшению всех характеристик двигателя не существует.

Выполнив работу по анализу имеющейся в доступе литературы, также предоставляется возможным сделать определенные выводы:

- по итогу испытаний дизельных двигателей становится более явной вероятность использования таких добавок к топливу как вода и водород;
- многочисленные исследования и приобретенный навык, касающиеся темы изменения свойств и качеств топлива, которые получены как зарубежными, так и российскими учеными, показывают, что при добавлении водо-водородной смеси в дизельное топливо меняются в положительном направлении и экологические, и экономические показатели двигателя. К тому же данное изменение способствует существенной экономии традиционного нефтяного топлива;
- проведенный анализ позволяет выделить водород в качестве основного компонента топлива для дизеля. Самым удачным и доступным способом предполагается его применение в сочетании именно с водой. Используемое сочетание просто в применении и признано одним из наиболее эффективных методов. Оно позволит улучшить показатели работы дизелей, уже находящихся в эксплуатации, без существенного изменения конструкции двигателя;
- известные на сегодняшний день научные технические решения позволяют адаптировать дизельный двигатель к работе с использованием альтернативных добавок к топливу не в полной

мере. По этой причине решение указанных вопросов требует более подробных теоретических и экспериментальных обоснований, подтверждаемых дальнейшими исследованиями.

Сделанные выводы позволяют сформулировать цель и задачи исследования.

Цель исследований заключается в следующем: оценить эффективные показатели стационарных дизельных установок при использовании способа добавления водо-водородной смеси к основному топливу.

Среди задач, которые ставятся для проведения более подробных исследований, можно выделить основные:

- определить такие добавки к топливу, которые позволят улучшить эффективные показатели стационарных дизельных установок;
- выявить предполагаемый способ обеспечения повышения эффективных показателей в диапазоне 3-7%.

2. Патентные исследования

Цели и задачи:

- совершенствование объекта техники путем известного прогрессивного технического решения;
- установление возможности использования объекта техники.

2.1. Исследование уровня вида техники

2.1.1. Описание объекта техники

Описание объекта техники (ОТ) включает [8]:

- назначение и область применения ОТ,
- описание конструкции и работы устройства (описание способа, вещества),
- недостатки ОТ и их причины,
- эскиз объекта.

Объект техники – дизельное топливо.

Дизельное топливо предназначено для работы двигателя внутреннего сгорания, ДВС марки ВАЗ-341.

Дизельное топливо содержит воду, водород и ультразвуковой пар.

Недостатком является большой расход топлива и выброс в атмосферу вредных газов (оксида серы, оксида азота и сажи). Это ведет к снижению эффективности показателей работы двигателя.

Целью патентного исследования является усовершенствование ОТ за счет устранения недостатков. В рассмотренном объекте недостатком является снижение эффективных показателей работы двигателя.

2.1.2. Определение стран проверки

Странами проверки были выбраны ведущие страны в области машиностроения: Россия, Германия, Япония, США и Франция.

При патентном исследовании вещества (дизельное топливо) были определены следующие виды технических решений:

- вещество, его качественный состав,
- исходные материалы.

2.1.3. Определение рубрик МКИ и УДК

В качестве ключевого слова выбираем «двигатель внутреннего сгорания». По ключевому слову на сайте ФИПС уточняем рубрику и выбираем раздел [35].

Данному названию соответствуют следующие индексы Международной классификации изобретений (МПК):

Раздел:

В – Различные технологические процессы; транспортирование

С – Химия; металлургия

F – Машиностроение; освещение; отопление; двигатели и насосы; оружие и боеприпасы; взрывные работы

Класс:

F02 – «Двигатели внутреннего сгорания; силовые установки, работающие на горячих газах или продуктах сгорания» [35].

Подкласс:

F02В – «Поршневые двигатели внутреннего сгорания; двигатели, работающие от сжигания топлива вообще» [35].

F02М – «Системы подачи топлива или горючей смеси для двигателей, работающих от сжигания топлива вообще, и составные части этих систем» [35].

F02N – «Запуск двигателей, работающих от сжигания топлива» [35].

Группа:

F02В 43/00 – «Двигатели, работающие на газообразном топливе; силовые установки с такими двигателями» [35].

F02В 45/00 – «Двигатели, работающие на ином нежидком топливе; силовые установки с такими двигателями» [35].

F02B 47/00 – «Рабочие процессы двигателей, включающие присадку негорючих веществ или антидетонационных агентов к воздуху, топливу или горючей смеси» [35].

F02B 69/00 – «Двигатели внутреннего сгорания, конвертируемые в двигатели других типов, не отнесенные к 11/00; двигатели внутреннего сгорания различных типов, отличающиеся конструктивным оформлением, обеспечивающим применение одних и тех же узлов или деталей» [35].

F02M 21/00 – «Устройства для питания двигателей нежидким топливом, например, газообразным, хранимым в жидкой фазе» [35].

F02M 25/00 – «Устройства для добавления негорючих веществ или небольших количеств вторичного топлива в воздух, основное топливо или горючую смесь» [35].

F02M 43/00 – «Топливовпрыскивающая аппаратура, работающая одновременно на двух или более видах топлива или на жидком топливе и какой-либо другой жидкости, например, антидетонационной присадке» [35].

F02M 55/00 – «Топливовпрыскивающая аппаратура, отличающаяся топливопроводами или устройствами для выпуска из них воздуха» [35].

F02N 17/00 – «Прочие средства для запуска; вспомогательные средства, не отнесенные к другим рубрикам» [35].

Подгруппа:

F02B 43/02 – «Двигатели, работающие на газообразном топливе; силовые установки с такими двигателями – с устройствами для повышения коэффициента полезного действия» [35].

F02B 43/10 – «Двигатели, работающие на газообразном топливе; силовые установки с такими двигателями – двигатели или установки, работающие на других специфических газах, например, ацетилене, гремучем газе» [35].

F02B 43/12 – «Двигатели, работающие на газообразном топливе; силовые установки с такими двигателями – рабочие процессы» [35].

F02B 45/10 – «Двигатели, работающие на ином нежидком топливе; силовые установки с такими двигателями – на смеси жидкого и нежидкого топлива, например, в тестообразном или вспененном состоянии» [35].

F02B 47/02 – «Рабочие процессы двигателей, включающие присадку негорючих веществ или антидетонационных агентов к воздуху, топливу или горючей смеси – воды или водяного пара» [35].

F02B 47/04 – «Рабочие процессы двигателей, включающие присадку негорючих веществ или антидетонационных агентов к воздуху, топливу или горючей смеси – иных веществ или их смеси с водой или водяным паром» [35].

F02M 21/02 – «Устройства для питания двигателей нежидким топливом, например, газообразным, хранимым в жидкой фазе – газообразным топливом устройства для испарения топлива путем подогрева 31/00; двигатели с устройствами, генерирующими газ из твердого топлива, например, из дерева F 02B 43/08» [35].

F02M 25/022 – «Устройства для добавления негорючих веществ или небольших количеств вторичного топлива в воздух, основное топливо или горючую смесь – для добавления топлива и водной эмульсии, воды или пара» [35].

F02M 25/10 – «Устройства для добавления негорючих веществ или небольших количеств вторичного топлива в воздух, основное топливо или горючую смесь – для добавления ацетилена, водорода (не из воды), кислорода (не из воздуха) или озона» [35].

F02M 43/04 – «Топливовпрыскивающая аппаратура, работающая одновременно на двух или более видах топлива или на жидком топливе и какой-либо другой жидкости, например, антидетонационной присадке – форсунки» [35].

F02N 17/08 – «Прочие средства для запуска; вспомогательные средства, не отнесенные к другим рубрикам – облегчение запуска иными, чем тепловые, средствами» [35].

В данном патентном анализе осуществлялся отбор патентов по смежным направлениям для предоставления возможности выбора более прогрессивных подходов и современных технических заключений. Преимущественным правом при анализе пользовались отечественные патенты с глубиной поиска 15-20 лет. Причиной выбора такого периода послужил тот факт, что для данных временных рамок свойственно применение более прогрессивных и современных технических решений. В дальнейшем этот анализ можно использовать для процедуры патентования.

Патентный поиск осуществлялся по вопросам определения уровня техники вещества для повышения эффективных показателей дизельных установок и ДВС (Приложение А).

2.1.4. Выбор глубины поиска

Глубина поиска – это период времени, в течение которого издавалась документация, представляющая интерес [8].

Берем глубину поиска от 15 до 20 лет.

2.1.5. Определение источников информации

При патентном исследовании источниками патентно-технической информации послужили:

- авторские свидетельства по соответствующим рубрикам МКИ,
- официальные бюллетени патентных ведомств,
- технические журналы,
- техническая литература.

Первая стадия исследования заканчивается составлением регламента поиска, который приведен в таблице 6.

Таблица 6 – Регламент поиска ОТ «двигатель внутреннего сгорания»

РЕГЛАМЕНТ ПОИСКА № 1				
Объект: <u>Двигатель внутреннего сгорания</u>				
Вид исследования: <u>Исследование уровня вида техники</u>				
Предмет поиска (ИТР)	Страна поиска	Индексы МКИ и УДК	Глубина поиска, лет	Источники информации
Дизельное топливо	Россия США Япония	C01B 3/50 C10G 1/00 C10G 2/00 C10G 3/00 C10G 45/58 C10G 65/14 C10L 1/04 C10L1/182 C10L1/22 C10L1/32 C10L 3/00 F02B 19/12 F02B 43/00 F02B 43/10 F02M 21/02 F02M 25/022 F02M 25/10 F02M 27/02 F02M 31/18 F02M 43/04 F02N 17/08	20 (2003-2023)	https://www.fips.ru/ http://allpatents.ru/

2.2. Способы подачи топлива и устройства для его получения

Из уровня техники вещества известны следующие жидкие углеводородные топлива и способы их получения: [патент RU 2423411, дата приоритета от 10.07.2011], «включающий жидкое углеводородное топливо с присадками, в частности к пожаробезопасным вводно-топливным микроэмульсиям. Топливная композиция, содержит дизельное топливо, воду, диэтаноламид олеиновой кислоты, диэтаноламиновое мыло олеиновой кислоты, диэтаноламин, дополнительно содержащая моноэфир олеиновой кислоты и диоксиэтилпиперазина, композицию спиртов C4-C7, а в качестве дизельного топлива композиция содержит дизельное топливо зимнее при

следующем соотношении компонентов, мас. %: диэтаноламид олеиновой кислоты 3,960-4,840; диэтаноламиновое мыло олеиновой кислоты 1,199-1,465; диэтаноламин 0,507-0,620; моноэфир олеиновой кислоты и диоксиэтилпиперазина 0,400-0,488; композиция спиртов C4-C7 0,594-0,727; вода 9,0-11,0; дизельное топливо зимнее – остальное до 100. Технический результат – расширение температурного интервала применения пожаробезопасных дизельных топлив. Изобретение относится к жидким углеводородным топливам с присадками, в частности к пожаробезопасным водно-топливным микроэмульсиям, и может найти применение на дизельных двигателях, работающих в условиях повышенной пожароопасности» [27].

Недостатком описанного способа можно указать то, что в применяемой смеси применено существенно маленькое число эмульгатора (8% эмульгатора на 10% воды). По этой причине стабильность эмульсии около 6 месяцев, что является недостаточным. Такая эмульсия становится стабильной только при отрицательных температурах. Ко всему прочему она довольно пожароопасна из-за присутствия в ее составе алифатических спиртов (около 20%). Наличие в составе метанола (в объеме 6%) делает ее экологически вредной и токсически опасной.

Известен «способ получения дизельного топлива или добавок к топливу из биологического материала посредством получения парафинов в реакции Фишера-Тропша, с одной стороны, и посредством каталитической гидродеоксигенации масел и жиров биологического происхождения» [27], с другой стороны [патент RU 2491319, дата приоритета от 09.11.2007].

«Изобретение обеспечивает высококачественную фракцию среднего дистиллята из различных биологических источников. Изобретение также относится к установке для получения топлива из биологического материала. Технический результат – получение высококачественного дизельного топлива из ресурсов, имеющих полностью биологическое происхождение. В патенте США 2007/0225383 описан способ конверсии биомассы в синтезгаз и проведения реакции Фишера-Тропша с целью преобразования газа в топливо

и другие химические вещества. Настоящее изобретение предлагает интегрированный способ получения высококачественного дизельного топлива из двух различных источников биологического материала» [27].

Недостатком описанного способа является то, что способ, которым получают топливо в рассматриваемом изобретении, реализовывают совместно с деревоперерабатывающей конструкцией. Воду, которую получают при указанном способе, как правило, доставляют в показанную конструкцию для очищения.

Наиболее близким техническим решением, которое взято за прототип, является изобретение «Способ подачи в ДВС с искровым зажиганием водо-водородного топлива, водо-водородное топливо, и устройство для его получения», характеризующееся тем, что в камеру сгорания цилиндров ДВС с искровым зажиганием подают подготовленную топливную смесь через впускной воздушный коллектор и далее в камеру сгорания цилиндров ДВС соответственно на такте всасывания [патент RU 2725648, дата приоритета от 30.08.2019].

Технический результат: улучшение экологичности за счет снижения вредных выбросов, а также обеспечение высокого КПД. Водо-водородное топливо для ДВС с искровым зажиганием используют в виде озонированной водо-водородно-воздушной смеси, содержащей ультразвуковой водяной пар, обогащенный водородом и смешанный с озонированным атмосферным воздухом, при этом водород в смеси с озоном из озонированной водо-водородно-воздушной смеси сгорает в камере сгорания цилиндров ДВС на такте сжатия с получением перегретого водяного пара. Топливо, использованное в данном способе, и устройство для его получения относятся к двигателестроению, и может быть использовано в поршневых двигателях внутреннего сгорания с искровым зажиганием, в частности, в газовых поршневых двигателях с искровым зажиганием, а также в бензиновых и дизельных ДВС [27].

Недостатком описанного способа является то, что применение чистого водорода в камере сгорания порождает ряд проблем: водород из-за высокой температуры сжатия легко вступает в реакцию с различными металлическими элементами силовой установки и даже с моторным маслом. Вследствие этого требуется найти такое сочетание компонентов топливной смеси, в котором водород находится в малых количествах, но без ущерба для энергоемкости процесса сгорания.

На рисунке 11 представлено распределение выданных охранных документов (полезных моделей, патентов на изобретение) за последние 20 лет с ключевым словом поиска «водо-водородное топливо в дизель» [36].

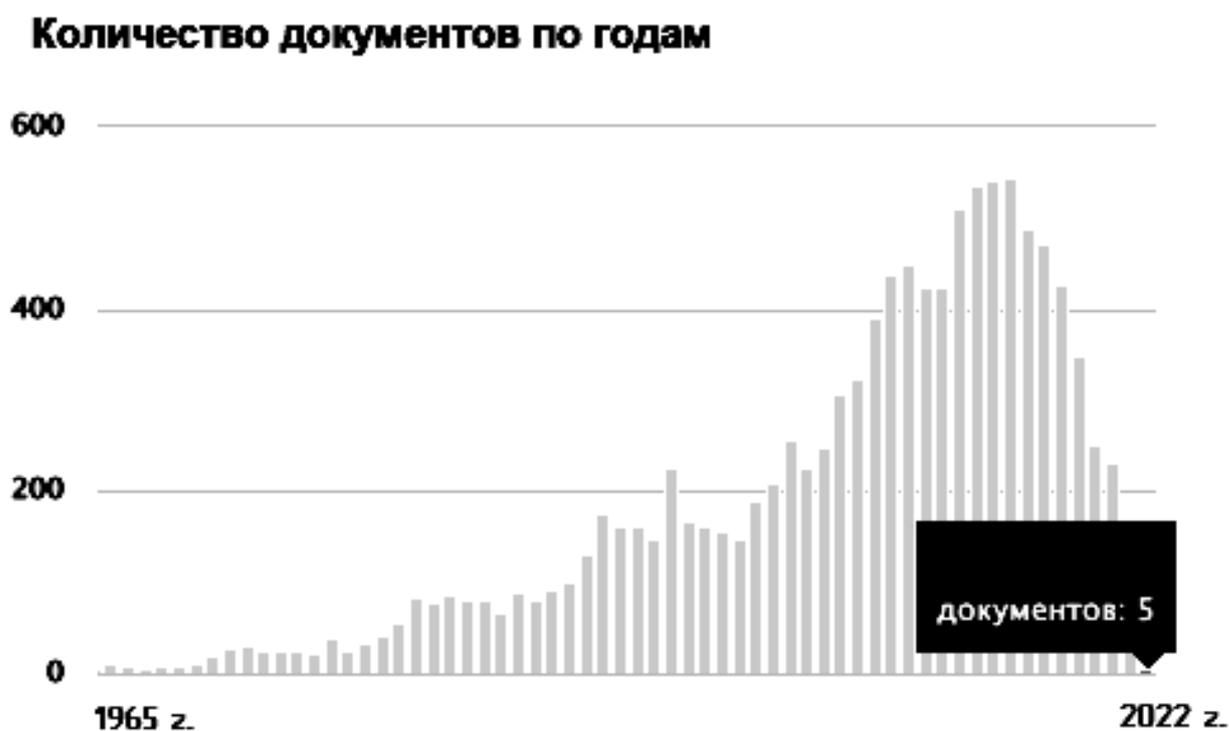


Рисунок 11 – Количество выданных охранных документов за последние 20 лет, по выбранным индексам МПК

Из рассмотрения диаграмм на рисунке 15 видно, что наибольшее количество выданных охранных документов приходится на 2014 год (543

документа), в то время как в 2022 году их количество значительно уменьшилось (5 документов).

Таким образом, можно сделать вывод о том, что существенных открытий и изобретений в направлении использования в дизелях водородного топлива за последние 9 лет не производилось.

Целью настоящего изобретения является способ увлажнения воздуха, основанный на ультразвуковом испарении воды, ионизации воздуха на впуске и способ добавки водо-водородной смеси к основному топливу для дальнейшего их использования при изготовлении дизель генераторных установок различного назначения.

Раскрытие изобретения.

Объектом техники является поршневой, четырехцилиндровый, четырехтактный дизельный двигатель, рабочим объемом $V_h = 1,5$ л, жидкостной системой охлаждения.

Испытания осуществляются в моторном боксе. Оборудование оснащено в соответствии с ГОСТ 14846-81. Температура воздуха во время проведения испытаний варьируется в диапазоне 20-40 °С. Давление, определяется в диапазоне средних значений изменения атм. давления. Результаты испытаний считаются достоверными, если в течение времени проведения испытаний атмосферный фактор F остается в пределах $0,93 < F < 1,07$. Оборудование, которое использовалось для проведения замеров, занесено в таблицу 7.

Таблица 7 – Оборудование для испытаний

Перечень средств измерений		Класс точности/ погрешность	Измерения, диапазон
Гидравлический тормоз	SCHENK № LLF0401		
Весы для измерения крутящего момента	SCHENK № NRD6732	$\pm 0,5$	1: 0 ÷ 20 кг·с 2: 15 ÷ 50 кг·с

Продолжение таблицы 7

Перечень средств измерений		Класс точности/ погрешность	Измерения, диапазон
Канал измерения числа оборотов: - датчик числа оборотов	Датчик Холла А3144	$\pm 10 \text{ мин}^{-1}$	$(0 \div 10000) \text{ мин}^{-1}$
Температура и влажность окружающей среды:	Цифровой комбинированный датчик АНТ-10	$\pm 0,3^\circ\text{C}$	$(-40 \div 85)^\circ\text{C}$
Влажность окружающей среды:		$\pm 2\%$ при 25°C	$(0 \div 100) \%$
Давление окружающей среды:	Датчик абсолютного барометрического давления BMP280	$\pm 0,12 \text{ гПа}$	$(300 \div 1100) \text{ гПа}$
Канал измерений температуры воды: - преобразователь - термопара	УКТ-38-Щ4-ТП ХК Т-49-5	$\pm 1 \%$ $\pm 2 \%$	$(0 \div 1000) ^\circ\text{C}$ $(-200 \div 1200) ^\circ\text{C}$
Канал измерений температуры охлаждающей жидкости:	Датчик температуры (штатный)	$\pm 5 \%$	$(-35 \div 150) ^\circ\text{C}$
Канал измерения расхода воздуха	ДМРВ ВА3 116	$\pm 0,2 \%$	$(0 \div 800) \text{ кг/ч}$
Состав отработавших газов:	Газоанализатор фирма «МЕТА» «Автотест02.03.П»	Абс. $\pm 10 \text{ ppm} \pm 5\%$ Абс. $\pm 0.03\% \pm 3\%$ Абс. $\pm 0.5 \pm 4\%$ Не нормируется Абс. $\pm 50 \text{ ppm} \pm 5\%$	$(0 \div 200) \text{ ppm}$ $(200 \div 2000) \text{ ppm}$ $(0 \div 1) \%$ $(1 \div 5) \%$ $(0 \div 12.5) \%$ $(12.5 \div 16) \%$ $(0 \div 1000) \text{ ppm}$ $(1000 \div 5000)$
СН (углеводороды)			
СО (оксид углерода)			
СО ₂ (диоксид углерода)			
λ-параметр			
NO _x (окислы азота)			
Весы электронные	DL-3000WP	Абс. ± 0.02	$(0.01 \div 3200) \text{ г}$
Дымомер МЕТА-01	МЕТА-01	$\pm 0,05 \text{ м}^{-1}$	$(0 \div \infty) \text{ м}^{-1}$
Контроль частоты вращения двигателя (тормозного стенда)	DT2234B	$\pm 10 \text{ мин}^{-1}$	$(0 \div 10000) \text{ мин}^{-1}$
Весы: - тензодатчик силы - преобразователь	БП-05-50 ПВИ 1055-06-2011	$\pm 0,1 \text{ кг}$	$(0 \div 50) \text{ кг}$
Напряжение питания электролизера: - осциллограф	TDS 2024B	$\pm 0,01$	$(0 \div 24) \text{ В}$
Сила тока: - шунт	75 ШСМ-1-100-0,5	$\pm 1,0\%$ Класс точности 0,5	$(0-100) \text{ А}$

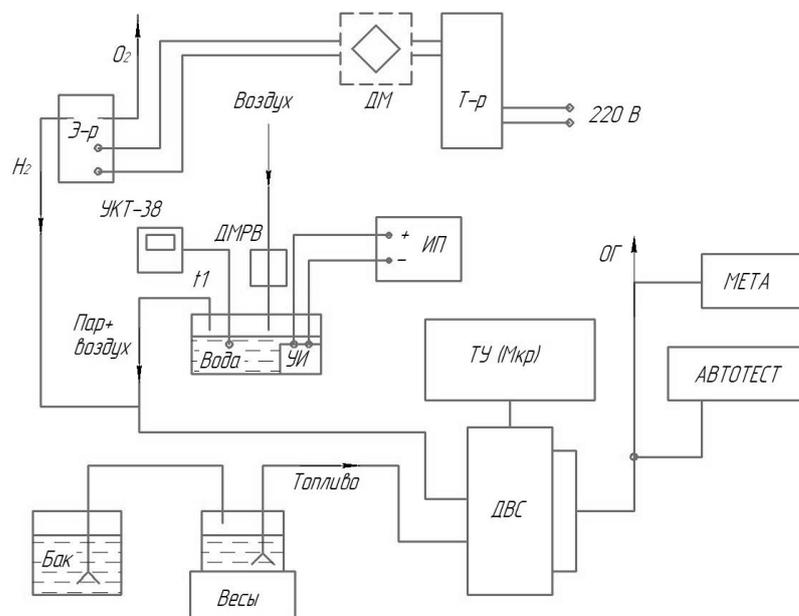
Перед началом работ двигатель обрабатывается модификатором поверхности камеры сгорания «Eso booster» в объеме 20 моточасов на режиме 100% нагрузки цикла.

Далее дизель прогревается при нагрузке, которая определяется диапазоном 80-85% от мощности, до того момента пока все параметры двигателя не стабилизируются. Только после этого осуществляется замер параметров двигателя. Минимальная продолжительность режима составляет 10 минут. В таблице 8 представлен выбранный испытательный цикл D1 ISO 8528-1.

Таблица 8 – Цикл испытаний

№ режима (цикл D1)	1	2	3	4	5	-	-	-	-	-	-
Частота вращения	Заявленная, $n = 1300 \text{ мин}^{-1}$					Промежуточная					Минимальная холостого хода
Крутящий момент, %	100	75	50	25	10	-	-	-	-	-	-
Крутящий момент, Нм	59,5	44,8	29,8	14,9	6,0	-	-	-	-	-	-
Весовой коэффициент	0,3	0,5	0,2			-	-	-	-	-	-

На следующем этапе проводились работы по дооборудованию стенда системой подачи ультразвукового пара и системы ионизации воздуха на впуске, а также работы по дооборудованию стенда системой подачи водорода. На рисунке 12 представлена принципиальная схема подачи водородного топлива в двигатель и питания электролизера. На рисунке 13 изображена система подачи ультразвукового пара и системы ионизации воздуха на впуске.



t1 – датчики температур; ДВС – двигатель внутреннего сгорания; УКТ-38 – преобразователь измеритель датчиков температуры; ДМРВ – датчик массового расхода воздуха; УИ – ультразвуковой испаритель; ИП – регулируемый источник питания; ТУ – тормозное устройство; ДВС – двигатель внутреннего сгорания; АВТОТЕСТ – газоанализатор; МЕТА – дымомер; Э-р – электролизер (РОМ); Т-р – трансформатор.

Рисунок 12 – Схема подачи водорода в двигатель



Рисунок 13 – Система подачи ультразвукового пара и системы ионизации воздуха на впуске

В таблице 9 представлены результаты определения производительности электролизера в зависимости от потребляемой мощности.

Таблица 9 – Производительность электролизера в зависимости от потребляемой мощности

№	Производительность, V л/ч	Напряжение U, В	Сила тока I, А	Мощность Q, Вт	Примечание
1	118	14,5	56	812	Питание от сети

Из таблицы 9 видно, что при питании от сети потребляемая мощность электролизером довольно значительная, и ее необходимо учитывать.

Параметры работы ДВС определяются в соответствии с требованиями ГОСТ 14846-81, в частности: эффективная мощность; расход жидкого топлива.

В соответствии с ГОСТ 14846-81 осуществляется дальнейшее определение остальных показателей, в особенности – удельный расход топлива.

Установление числа токсичных составляющих в отработавших газах определяется с учетом методик, предусмотренных ГОСТ 31967-2012 «Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Выбросы вредных веществ с отработавшими газами. Нормы и методы определения».

Ключевые результаты представлены в таблицах 10 и 11 и на рисунках 14 и 15.

Таблица 10 – Значение коэффициента состава топлива

Вид топлива	Значение коэффициента состава топлива, м ³ /кг, для состояния отработавших газов	
	«влажное»	«сухое»
Дизельное	0,75	-0,77

Таблица 11 – Показатели выбросов токсических веществ

Наименование компонента	Полученное значение объема выбросов, %			
	без добавки	без добавки + МПКС	с добавкой GH ₂ O = 0 кг/ч, GH ₂ = 120 л/ч	с добавкой GH ₂ O=1,52 кг/ч, GH ₂ = 120 л/ч
Удельный средневзвешенный выброс оксидов азота (NO _x), e _{NO} г/(кВт·ч)	1,56	1,95	1,75	1,55
Удельный средневзвешенный выброс оксида углерода (CO), e _{CO} , г/(кВт·ч)	7,4	7,7	6,1	6,8
Удельный средневзвешенный выброс углеводородов (CH), e _{CH} , г/(кВт·ч)	0,76	0,36	0,30	0,27

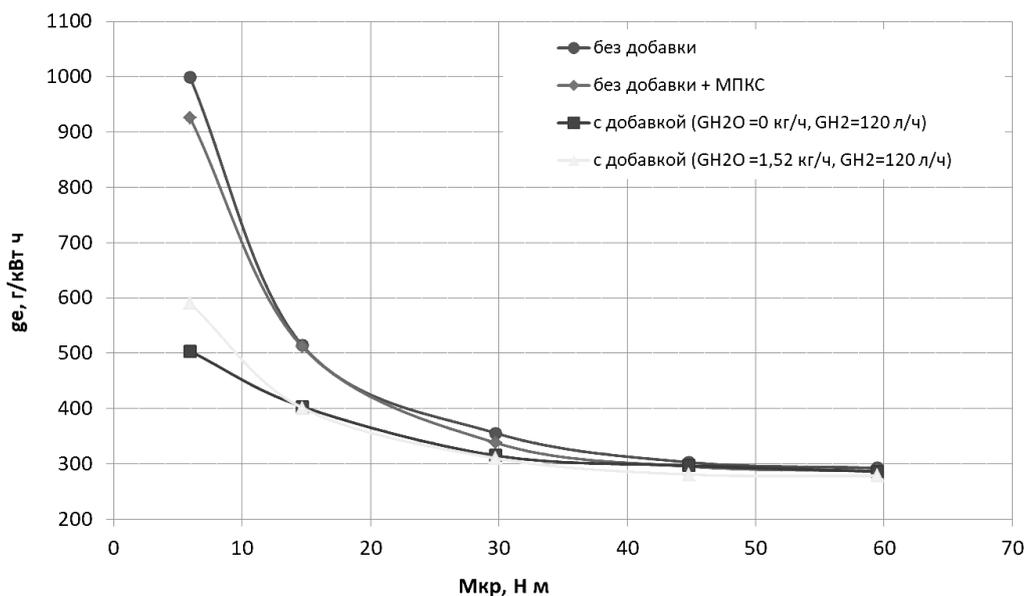


Рисунок 14 – Удельный эффективный расход топлива

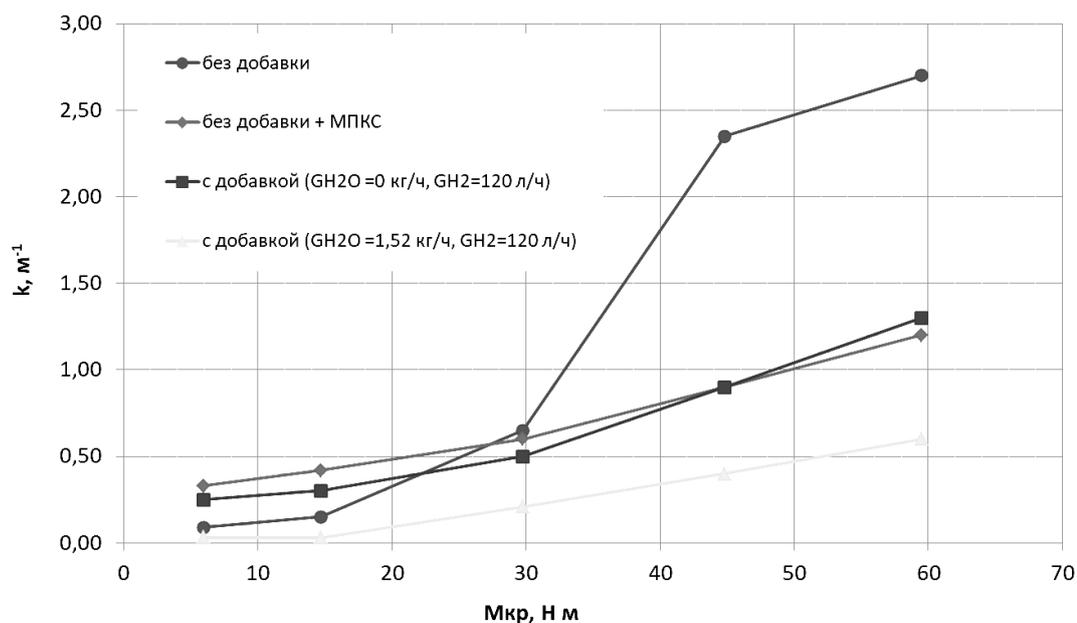


Рисунок 15 – Изменение дымности отработавших газов

Предложенный способ добавки водорода и добавки воды через ультразвуковой испаритель позволяет:

- снизить удельный эффективный расход топлива на отдельных режимах работы двигателя в среднем на 3-7%;
- оказывать значительное влияние на дымность отработавших газов. На отдельных режимах работы снижение дымности отработавших газов составляет более 50%.

Выводы по разделу 2: в целом по результатам работ можно сделать заключение о перспективности использования ВВТ с целью улучшения экологических и экономических параметров ДВС.

В качестве итога данного патентного исследования можно сделать следующее заключение:

- а) количество патентной информации и действующих патентов на изобретение и полезных моделей свидетельствует о возрастающем интересе к объектам настоящего патентного поиска;

б) из проведенного анализа можно выделить следующие направления развития и применения водо-водородного топлива в двигателях внутреннего сгорания, а именно:

- 1) совершенствование систем и устройств получения топлива;
- 2) совершенствование способов повышения эффективных показателей.

Отмеченные направления в дальнейшем можно использовать для патентного поиска. Технические решения, которые планируется реализовывать, вполне можно считать патентноспособными.

в) предложенный способ увлажнения воздуха, основанный на ультразвуковом испарении воды, ионизации воздуха на впуске, а также способ добавки водо-водородной смеси к основному топливу и дальнейшего их использования при изготовлении дизель генераторных установок различного назначения могут быть рекомендованы для подачи заявки на изобретение.

3. Описание теоретических и экспериментальных исследований о влиянии водо-водородной добавки на экономические и экологические показатели дизеля

Способ подачи водо-водородного топлива, само топливо и устройство для его получения может быть использовано в поршневых двигателях внутреннего сгорания, как с искровым зажиганием, так и в бензиновых и дизельных ДВС [29].

В качестве топлива для камеры сгорания ДВС известен опыт использования газообразного водорода. В ней водород сгорает при соединении с кислородом воздуха. Однако зачастую на любой установке требуется установить специальный прибор для электролиза (электролизер), который будет отделять водород от воды, чтобы затем получить нужную реакцию с кислородом в камере сгорания.

При использовании чистого водорода в камере сгорания выявляется ряд проблем: из-за высокой температуры сжатия водород легко вступает в реакцию с различными металлическими элементами силовой установки, в том числе и с моторным маслом. По этой причине требуется найти такое сочетание компонентов топливной смеси, в котором водород будет находиться в малых количествах, но при этом не будет нанесен ущерб энергоемкости процесса сгорания.

Так, например, ультразвуковой водяной пар, получают в ультразвуковом увлажнителе воздуха, содержащим основной узел – излучатель. Излучатель выполнен в виде шайбы из пьезокерамической керамики, с выведенными посеребренными электродами. При подаче на него переменного тока этот элемент начинает вибрировать с ультразвуковой частотой и разбивать поверхность воды на мельчайшие частички. Таким образом получается водяной «туман» или ультразвуковой водяной пар.

3.1. Проведение экспериментальных исследований

Целью проведения экспериментов считается определение влияния добавки водо-водородного топлива к основному топливу на рабочий цикл и на эффективные показатели дизельного двигателя.

Способ, который используется при проведении данного исследования, заключается в том, что к основному топливу добавляется водо-водородное топливо. Вследствие чего совершается замена традиционного дизельного топлива на альтернативное. Новое топливо получается более экологически чистым, его получение не ограничено, а ресурсы восстанавливаемы.

Испытания осуществлялись в моторном боксе. Температура воздуха во время проведения испытаний варьировалась в диапазоне 20-40 °С. Давление, определялось в диапазоне средних значений изменения атм. давления.

Объект испытаний – поршневой, четырехцилиндровый, четырехтактный дизельный двигатель, рабочим объемом $V_h = 1,5$ л и жидкостной системой охлаждения.

«При выполнении работ принят экспериментальный метод исследований путем снятия характеристик ДВС» [9]. Это решение было принято по причине того, что изучаемые процессы довольно трудно исследовать и охарактеризовать. Из-за этого возникает сложность при описании данных процессов теоретически. Также при проведении испытаний экспериментальным способом результаты получаются более точно приближенными к действительным значениям изучаемого предмета.

Оборудование, которое использовалось для проведения замеров, занесено в таблицу 12.

Таблица 12 – Оборудование для испытаний

Перечень средств измерений	Тип прибора	Измерения, диапазон
Гидравлический тормоз	SCHENK № LLF0401	
Весы, измеряющие крутящий момент	SCHENK № NRD6732	1: 0 ÷ 20 кг·с 2: 15 ÷ 50 кг·с
Канал измерения числа оборотов: - датчик числа оборотов	Датчик Холла А3144	(0 ÷ 10000) мин ⁻¹
Температура и влажность окружающей среды:	Цифровой комбинированный датчик АНТ-10	(-40 ÷ 85) °С
Влажность окружающей среды:		(0 ÷ 100) %
Давление окружающей среды:	Датчик абсолютного барометрического давления BMP280	(300 ÷ 1100) гПа
Канал измерений температуры воды: - преобразователь - термопара	УКТ-38-Щ4-ТП ХК Т-49-5	(0 ÷ 1000) °С (-200 ÷ 1200) °С
Канал измерений температуры охлаждающей жидкости:	Датчик температуры (штатный)	(-35 ÷ 150) °С
Канал измерения расхода воздуха	ДМРВ ВА3 116	(0÷800) кг/ч
Состав отработавших газов:	Газоанализатор «МЕТА» «Автотест02.03.П»	(0 ÷ 200) ppm
СН (углеводороды)		(200 ÷ 2000) ppm
СО (оксид углерода)		(0 ÷ 1) %, (1 ÷ 5) %
СО ₂ (диоксид углерода)		(0 ÷ 12.5) %, (12.5 ÷ 16) %
λ-параметр		Не нормируется
NO _x (окислы азота)	(0 ÷ 1000) ppm (1000 ÷ 5000)	
Весы электронные	DL-3000WP	(0.01 ÷ 3200) г
Дымомер МЕТА-01	МЕТА-01	(0 ÷ ∞) м ⁻¹
Контроль частоты вращения двигателя (тормозного стенда)	DT2234B	(0 ÷ 10000) мин ⁻¹
Весы: - тензодатчик силы - преобразователь	БП-05-50 ПВИ 1055-06-2011	(0 ÷ 50) кг
Напряжение питания электролизера: - осциллограф	TDS 2024B	(0 ÷ 24) В
Сила тока: - шунт	75 ШСМ-1-100-0,5	(0-100) А

Сравнительные лабораторно-стендовые испытания предусматривают несколько этапов.

3.2. Порядок проведения испытаний

Перед началом работ двигатель был обработан модификатором поверхности камеры сгорания «EcoBOOSTER», в объеме 20 моточасов на режиме 100% нагрузки цикла D1 ISO 8528-1.

Затем на первом этапе выполнялись работы по определению базовых параметров двигателя для формирования цикла D1 ISO 8528-1.

Далее дизель прогревался при нагрузке, которая определялась диапазоном 80-85% от мощности, до того момента пока все параметры двигателя не стабилизируются. Только после этого осуществлялся замер параметров двигателя. Минимальная продолжительность режима составляла 10 минут.

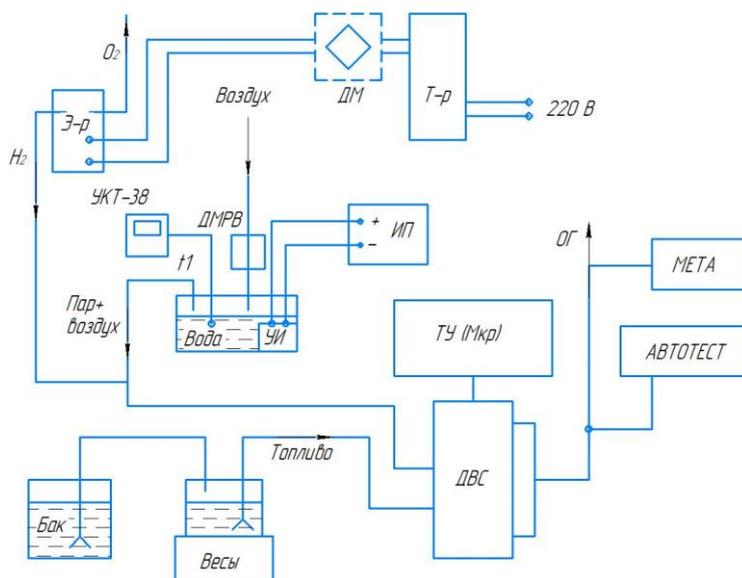
Первичные результаты занесены в таблицу приложения Б. В таблице 13 представлен выбранный испытательный цикл D1 ISO 8528-1.

Таблица 13 – Цикл испытаний

№ режима (цикл D1)	1	2	3	4	5	-	-	-	-	-	-
Частота вращения	Заявленная, $n = 1300 \text{ мин}^{-1}$					Промежуточная					Минимальная холостого хода
Крутящий момент, %	100	75	50	25	10	-	-	-	-	-	-
Крутящий момент, Нм	59,5	44,8	29,8	14,9	6,0	-	-	-	-	-	-
Весовой коэффициент	0,3	0,5	0,2			-	-	-	-	-	-

На следующем этапе проводились работы по дооборудованию стенда системой подачи водорода и системой подачи ультразвукового пара. На

рисунке 16 представлена принципиальная схема подачи ВВТ в двигатель и питания электролизера.



t1 – датчики температур; ДВС – двигатель внутреннего сгорания; УКТ-38 – преобразователь измеритель датчиков температуры; ДМРВ – датчик массового расхода воздуха; УИ – ультразвуковой испаритель; ИП – регулируемый источник питания; ТУ – тормозное устройство; ДВС – двигатель внутреннего сгорания; АВТОТЕСТ – газоанализатор; МЕТА – дымомер; Э-р – электролизер (РОМ); Т-р – трансформатор.

Рисунок 16 – Принципиальная схема подачи водорода в двигатель при питании электролизера от сети



Рисунок 17 – Общий вид системы подачи ультразвукового пара



Рисунок 18 – Общий вид электролизера

На рисунках 17 и 18 представлен общий вид системы подачи ультразвукового пара и электролизер. Производительность электролизера определялась методом проливки мерной емкости объемом 0,558 л.

При питании от сети потребляемая мощность электролизером довольно значительная, и ее необходимо учитывать. Чтобы определить количество подаваемого пара в ДВС, проведены дополнительные измерения его расхода. Для этого бак с водой взвешивали при работающей системе подачи ультразвукового пара. Время замера составляло 30 минут, массовый расход воды составил 1,52 кг/ч. После корректировки таблицы 13 получаем окончательные значения, которые внесем в таблицу 14.

Таблица 14 – Цикл испытательный (уточненный)

№ режима (цикл D1)	1	2	3	4	5	-	-	-	-	-	-
Частота вращения	Заявленная, $n = 1300 \text{ мин}^{-1}$					Промежуточная					Минимальная, холостого хода
Крутящий момент, %	100	75	50	25	10	-	-	-	-	-	-
Крутящий момент, Нм	65,1	50,4	35,0	20,3	11,2	-	-	-	-	-	-
Весовой коэффициент	0,3	0,5	0,2			-	-	-	-	-	-

3.3. Обработка и анализ результатов испытаний

Показатели дизельного двигателя формируются на основании условий в ГОСТ 14846-81:

- «эффективная мощность определяется по формуле:

$$N_e = \frac{M_e \cdot n}{9550} [\text{кВт}], \quad (6)$$

где M_e – крутящий момент двигателя в Нм;

n – частота вращения коленчатого вала в мин^{-1} .

– расход жидкого топлива определяется по формуле:

$$Gm = 3,6 \cdot 10 \cdot \frac{\Delta G_m}{\tau} \left[\frac{\text{кг}}{\text{ч}} \right], \quad (7)$$

где ΔG_m – масса (навеска) топлива расходуемая за время проведения измерений;

τ – время измерения» [9].

Определение других показателей, в частности, удельного расхода, также производится по ГОСТ 14846-81.

Объемный расход ОГ измеряют любым прямым методом с последующим приведением к стандартным атмосферным условиям либо рассчитывают по измеренным значениям расхода воздуха и топлива на каждом режиме испытаний по формуле:

$$V_{exhj} = V_{air} + F_f B, \quad (8)$$

где F_f – коэффициент состава топлива или коэффициент приведения к нормальным атмосферным условиям расхода неразбавленных продуктов сгорания различных топлив ($\text{м}^3/\text{кг}$), принимаемой по таблице 15 для «сухого» или «влажного» состояния ОГ.

V_{air} – объемный часовой расход воздуха, приведенный к нормальным атмосферным условиям (давление $p_a = 101,3$ кПа, температура $T_a = 273$ К), $\text{м}^3/\text{ч}$;

B – массовый расход топлива, $\text{кг}/\text{ч}$.

Таблица 15 – Значение коэффициента состава топлива

Вид топлива	Значение коэффициента состава топлива, $\text{м}^3/\text{кг}$, для состояния отработавших газов	
	«влажное»	«сухое»
Дизельное	0,75	- 0,77

Для расчета объемного расхода ОГ допускают другие стандартные методы, например, метод баланса углерода и кислорода.

Число токсичных веществ в отработавших газах устанавливается в соответствии с ГОСТ 31967-2012 «Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Выбросы вредных веществ с отработавшими газами. Нормы и методы определения».

Удельный средневзвешенный выброс i -го вредного вещества рассчитывают по формуле:

$$e_i = 0,446 \mu_i \frac{\sum_{j=1}^m C_{ij} V_{exhj} W_j}{P_e \sum_{j=1}^m \overline{P_{ej}} W_j}. \quad (9)$$

«где μ_i – молекулярная масса i -го вредного веществ либо его эквивалент по приведению, кг/кмоль;

P_e – номинальная или полная мощность двигателя, кВт;

$\overline{P_{ej}}$ – относительная мощность двигателя, %;

W_j – весовой коэффициент j -го режима;

V_{exhj} – объемный часовой расход отработавших газов, приведенный к нормальным условиям во «влажном» или «сухом» состоянии, м³/ч;

C_i – объемная концентрация в отработавших газах i -го вещества, об.%» [12].

3.4. Результаты испытаний

Улучшение характеристики удельного эффективного расхода топлива графически показано на рисунке 19.

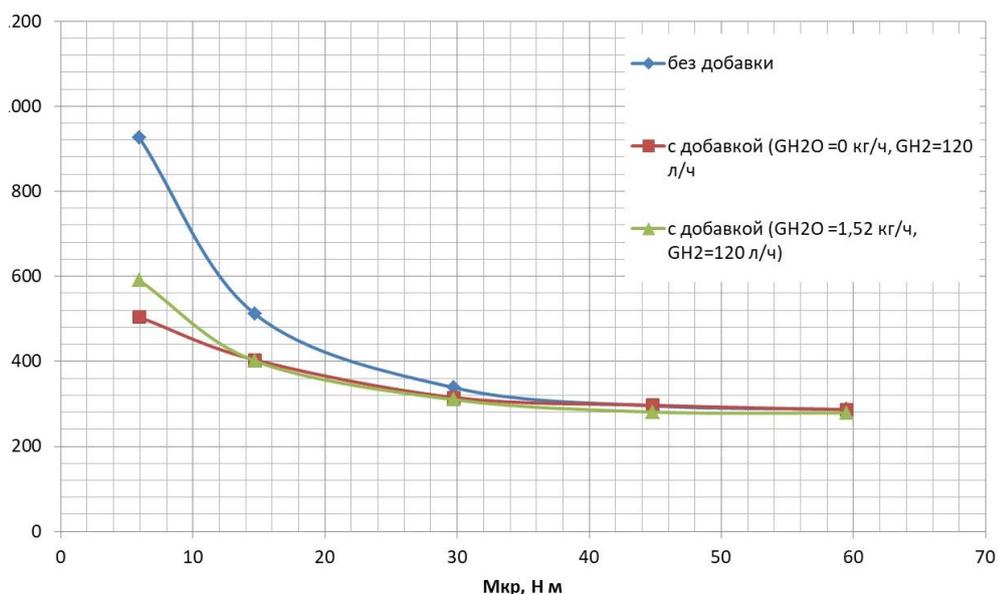


Рисунок 19 – Удельный эффективный расход топлива ($n = 1300 \text{ мин}^{-1}$)

На рисунке 20 представлены графики изменения дымности (коэффициента поглощения, к м^{-1}) отработавших газов (нагрузочная характеристика).

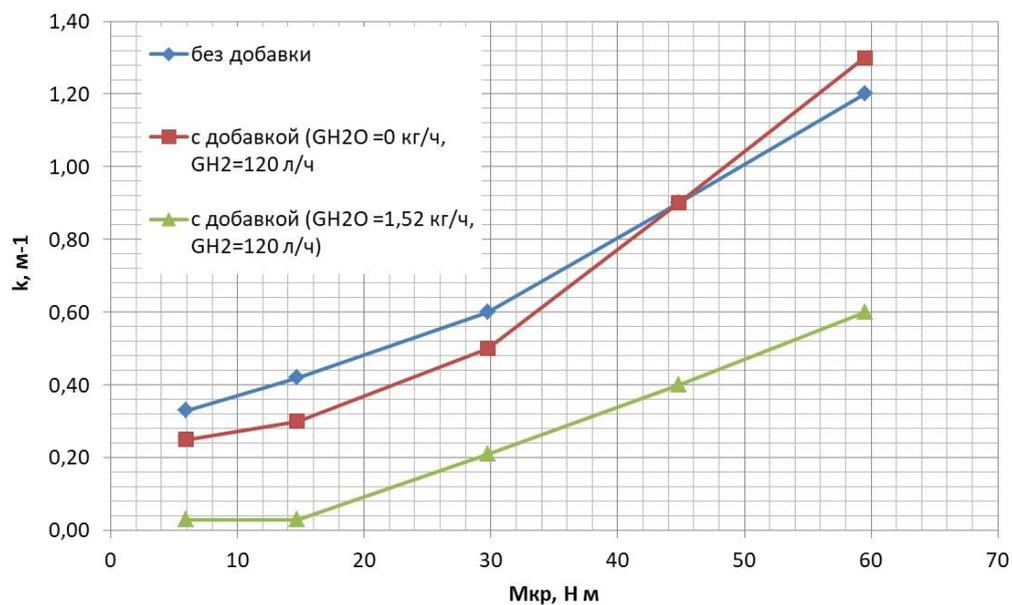


Рисунок 20 – Изменение дымности ОГ ($n = 1300 \text{ мин}^{-1}$)

Ключевые результаты показателей и значений количества выбросов в отработавших газах в окружающую среду внесены в таблицу 16.

Таблица 16 – Показатели выбросов токсических веществ

Наименование компонента	Полученные значения объема выбросов, %		
	без добавки	с добавкой ($G_{H_2O} = 0$ кг/ч, $G_{H_2} = 120$ л/ч)	с добавкой ($G_{H_2O} = 1,52$ кг/ч, $G_{H_2} = 120$ л/ч)
Удельный средневзвешенный выброс оксидов азота (NO_x), e_{NO} г/(кВт·ч)	1,95	1,75	1,55
Удельный средневзвешенный выброс оксида углерода (CO), e_{CO} г/(кВт·ч)	7,7	6,1	6,8
Удельный средневзвешенный выброс углеводородов (CH), e_{CH} г/(кВт·ч)	0,36	0,30	0,27

Главные значения, полученные при проведении экспериментального исследования, представлены в приложении Б (влияние добавки воды через ультразвуковой испаритель).

Выводы по разделу 3:

- разработана методика проведения лабораторных исследований по определению зависимости токсичности ОГ двигателя с добавкой водорода и ультразвукового пара во впускной коллектор;
- разработана методика проведения стендовых испытаний с добавкой водорода и ультразвукового пара;
- разработана технология выполнения испытаний двигателя, работающего на традиционном топливе и на топливе с использованием альтернативных добавок, таких как водород и вода (в качестве ультразвукового пара).

Характеристики, которые принимались за основные при оценивании качества и эффективности нового метода, послужили: удельный эффективный расход топлива, крутящий момент, токсичность выбросов.

Результаты проведенных испытаний показывают, что добавка водорода в объеме 120 л/ч и добавка воды через ультразвуковой испаритель в объеме 1,52 л/ч оказывают значительное влияние на работу двигателя:

- снижение удельных средневзвешенных выбросов оксидов азота (NO_x), eNO_x составило, около 10%;
- снижение удельных средневзвешенных выбросов оксида углерода (CO), eCO составило, около 12%;
- снижение удельных средневзвешенных выбросов углеводородов (CH), eCH составило около 25%;
- добавка воды в двигатель через ультразвуковой испаритель оказывает значительное влияние на дымность отработавших газов (коэффициент поглощения, $k \text{ м}^{-1}$). На режимах номинальной нагрузки снижение дымности отработавших газов составило от 30 до 60%;
- добавка водорода и воды через ультразвуковой испаритель снижает удельный эффективный расход топлива на практически значимых режимах работы двигателя в среднем на 3-7%.

В целом, перечисленные методы обеспечивают практически значимое снижение выбросов вредных веществ с отработавшими газами и способствуют выполнению требований и норм ГОСТ 31967-2012 «Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Выбросы вредных веществ с отработавшими газами. Нормы и методы определения» и ГОСТ ISO 8178-4-2013 «Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Измерение выброса продуктов сгорания. Часть 4. Испытательные циклы для двигателей различного применения на установившихся режимах».

Использование присадки воды и водорода, при условии, что вода подается в двигатель с помощью ультразвукового испарителя, показывает уменьшение удельного эффективного расхода топлива на 3-7%.

4. Экономическая эффективность использования добавки ВВТ к дизельному топливу

Рассчитаем эффективность расхода топлива стационарной дизельной установки.

При удельном эффективном расходе топлива $g_e = 200$ г/кВт·ч, а также учитывая подтвержденные экспериментально данные, экономия в 5% составит:

$$\frac{200 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч} \cdot 5\%}{100\%} = 10 \text{ г/ кВт}\cdot\text{ч}$$

При мощности установки в 500 кВт экономия расхода топлива составит:

$$500 \text{ кВт} \cdot 10 \text{ г/ кВт}\cdot\text{ч} = 5000 \text{ г/ч. Что составляет } \sim 6\text{-}7 \text{ литров.}$$

Работа стационарной дизельной установки в нормальном рабочем режиме: 24/7. В год это составляет: 8544 ч, с учетом простоя – 8300 ч.

При средней стоимости бензина 50 рублей за 1 литр и экономии топлива ~ 7 л/ч получаем:

$$50 \text{ руб/л} \cdot 7 \text{ л/ч} = 350 \text{ руб/ч,}$$

$$350 \text{ руб/ч} \cdot 8300 \text{ ч} \sim 2\,905\,000 \text{ руб.}$$

При стоимости топлива 100-250 рублей за 1 литр, получаем:

$$100 \text{ руб/л} \cdot 7 \text{ л/ч} = 700 \text{ руб/ч,}$$

и в итоге экономия на топливо составляет:

$$700 \text{ руб/ч} \cdot 8300 \text{ ч} \sim 5\,810\,000 \text{ руб.}$$

Таким образом, при экономии топлива в 5% за рабочий год, экономия средств составляет около 6 млн. рублей.

Заключение

В заключении следует отметить, что идея разработки такой конструкции, в основании которой находится дизель и система с применением альтернативного водо-водородного топлива, является достаточно перспективной.

С помощью проведенных исследований удалось решить актуальную научно-техническую задачу, которая имеет существенное значение. При выполнении диссертационной работы получены следующие основные результаты и выводы:

- а) на основе изученной и проанализированной литературы установлено, что при использовании в дизельных двигателях нового вида топлива на основании водо-водородной смеси становится возможным решить вопросы снижения токсичности отработавших газов и улучшения эффективных показателей дизелей. К тому же новый метод способствует существенной экономии традиционного нефтяного топлива;
- б) проведен анализ компонентов дизельного топлива на основе водорода и воды и установлено, что их совместное применение в двигателях внутреннего сгорания является перспективным направлением в разработке новых видов топлива. Получено обоснованное оптимальное содержание воды и водорода в ТВС для основных режимов работы дизельного двигателя;
- в) разработан оригинальный комбинированный метод добавки водо-водородного топлива в дизельный двигатель и макетный образец используемого устройства;
- г) проведены исследования по определению работоспособности метода и используемого устройства. На основе проведенного анализа выявлено, что добавление предлагаемой водо-водородной смеси к

дизельному топливу обеспечивает повышение эффективных показателей ДВС:

- 1) так в составе отработавших газов происходит снижение удельных средневзвешенных выбросов: оксидов азота в среднем до 10%, оксида углерода – до 12%; углеводородов – до 25%; снижение дымности отработавших газов от 30 до 60%. Что относится к экологическим показателям;
- 2) снижение удельного эффективного расхода топлива происходит в среднем на 3-7%. Что относится к экономическим показателям.

Предложенные решения подтверждены теоретически и экспериментально. Проведенное исследование открывает новые подходы к дальнейшему решению проблемы, связанной с повышением эффективных показателей дизельных двигателей и стационарных дизельных установок. Данное исследование открывает путь к последующему развитию и использованию новых технологий в двигателестроении.

В целом по результатам работ можно сделать заключение о перспективности использования водо-водородного топлива (ВВТ) с целью улучшения экологических и экономических параметров ДВС.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Бендик М.М., Фомин В.М., Сидоров М.И. Применение водорода в качестве компонента смесового топлива для транспортных дизелей // Горный информационно-аналитический бюллетень. – Изд-во Московского государственного горного университета, 2006. – № 12. – С. 161-167.
2. Бечина Э. Повышение показателей качества топлива для судовой энергетической установки // [Электронный ресурс]. – Электрон. журн. Н. Новгород, 2002. – Режим доступа: <https://pandia.ru/text/77/445/1546.php>
3. Бирюков А.Л. Улучшение эксплуатационных и экологических показателей бензиновых двигателей путем применения топливно-водных смесей : Дис. ... канд. технич. наук: 05.04.02 / Бирюков Александр Леонидович ; Санкт-Петербургский государственный аграрный университет. – Спб., 2011. – 178 с.
4. Бортников Л.Н. Активация горения углеводородных топлив водородом [Текст] / Л.Н. Бортников, М.М. Русаков, Р.Э. Петров // Вектор науки ТГУ. – 2012. – № 4(22). – С. 137-141.
5. Бортников Л.Н. Использование водорода как активатора горения для улучшения показателей ДВС с искровым зажиганием на режимах пуска и прогрева / Л.Н. Бортников, Д.А. Павлов, М.М. Русаков, В.В. Смоленский // Естественные и технические науки. – М.: Спутник +, 2013. – № 1 (63). – С. 341-345.
6. Бортников Л.Н. Оценка экономических и экологических показателей поршневых ДВС с искровым зажиганием при их работе на смеси «бензин-водород» [Текст] / Л.Н. Бортников, М.М. Русаков // Автомобильная промышленность. – 2008. – № 3. – С. 11-13.
7. ГенМастер : [сайт]. – Москва, 2019 – . – URL: <https://genmaster.ru> (дата обращения 16.06.2023). – Текст: электронный.
8. Гордеев А.В. Лекции по патентоведению : сб. лекций. [Текст] – Тольятти : ТолПИ, 1996. – 75 с.

9. ГОСТ 305-82. Топливо дизельное. Технические условия. – Введ. 01.01.83. – М. : ИПК : Издательство стандартов, 2003. – 10 с.
10. ГОСТ 14846-81. Двигатели автомобильные. Методы стендовых испытаний. – Введ. 01.01.82. – М. : ИПК : Издательство стандартов, 2003. – 42 с.
11. ГОСТ 31967-2012. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Выбросы вредных веществ с отработавшими газами. Нормы и методы определения. – Введ. 01.07.2014. – Москва : Стандартиформ, 2014. – 28 с.
12. Иванов А.А. Оценка эксплуатационных показателей машинно-тракторного агрегата при работе на метаноле-рапсовой эмульсии : Дис. ... канд. технич. наук: 05.20.01 / Иванов Александр Алексеевич ; Тверская государственная сельскохозяйственная академия. – Т., 2017. – 147 с.
13. Исследование динамики изменения выбросов вредных веществ от автомобильного транспорта в г. Москва с 2002 по 2030 годы / Азаров В.К., Васильев А.В., Кутенев В.Ф., Степанов В.В. // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. – 2015. – Т. 1. – № 4 (26). – С. 5-11.
14. Исследование рабочего процесса двигателя ВАЗ-2111 с добавкой водорода : отчет о НИР / ТолПИ, АО АВТОВАЗ. – 2000. – № 01.20.0004377.
15. Колчин А.И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей: учебное пособие для вузов / А.И. Колчин, В.П. Демидов. Изд. 2-е - перераб. и доп. – М.: Высш. Школа. – 1980.
16. Курников А.С. Совершенствование систем обеспечения обитаемости и повышение экологической безопасности судов на основе активированных окислительных технологий : Дисс. ... д-ра техн. наук : 05.08.03 /Курников Александр Серафимович ; Волжская государственная академия водного транспорта. – Н. Новгород, 2002. – 338 с.
17. Лебедев О.Н., Сомов В.А., Сисин В.Д. Водотопливные эмульсии в судовых дизелях. – Л.: Судостроение, 1988. – 108 с.

18. Лютко В. Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания : научное издание / В. Лютко, В.Н. Луканин, А.С. Хачиян. – М.: МАДИ, 2000. – 2 т. – 311 с.
19. Марков В.А., Вальехо Мальдонадо П.Р., Бирюков В.В. Спиртовые топлива для дизельных двигателей // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – М. : Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – 11(668)/2015. – с. 39-51.
20. Мельник А. Ю., Миникаева С.Н., Павлов С.Б., Харлампики Х.Э. Влияние воды на характеристики дизельного топлива // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – Т. 15. – № 24. – С. 123-125.
21. Мисбахов Р. Ш. Влияние добавок водорода на технико-экономические и экологические показатели газовых и дизельных двигателей : Дис. ... к.т.н. : 05.04.02 / Мисбахов Ринат Шаукатович ; Казанский государственный технический университет. – Казань, 2010. – 165 с.
22. Научно-технический портал о металлургии, горной промышленности, машиностроении, обработке металлов, энергетике : [сайт]. – Москва, 2007 – . – URL: <https://metallolome.ru/vodorod-i-vodorodnaya-energetika> (дата обращения 16.06.2023). – Текст: электронный.
23. Нахратова Е.В., Смоленский В.В., Петросян М.Ф., Худобердиев Х.А., Чеснакова Е.В., Гумяров Ш.Р. Анализ токсичности бензинового двигателя по результатам моделирования двигателя ВАЗ-21129 // Научный альманах : материалы междунар. науч.-практич. конф. «Наука, образование, общество». – Тамбов : Научный альманах, 2022. - № 4-2(90). – С.55-59.
24. Павлов Д.А., Бортников Л.Н. Исследование влияния добавок водорода на показатели ДВС при гетерогенном способе формирования ТВС // Вектор науки ТГУ. Сер. Машиностроение. – 2012. – № 4 (22). – С. 183-187.
25. Павлов Д.А., Пионтковская С.А., Смоленский В.В. Особенности применения водорода в ДВС при различных способах формирования топливновоздушных смесей // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Т.18. – 2016. – № 4 (5). – 7 с.

26. Патент на полезную модель № 42073 Российская Федерация, МПК 7 F02M 25/022. Система питания дизеля : № 2004121938/22 : заявл. 19.07.2004 : опубликовано : 20.11.04 / Свистула А.Е., Матиевский Д.Д., Калюжный Е.М., Тактак А. (РФ), Бюл. № 32. – 15 с. : ил. – Текст. : непосредственный.

27. ПатентСервис : [сайт]. – Москва, 2015 – . – URL: <http://allpatents.ru/mpk/F02N> (дата обращения 16.06.2023). – Текст: электронный.

28. Патент № 144071 Российская Федерация, МПК F02M25/022 (2006.01). Система для получения и подачи топливно-водной смеси в двс : № 2013152272/06 : заявл. 25.11.2013 : опубл. 10.08.2014 / Бирюков А.Л., Молин А.А. – 7 с. : ил. – Текст. : непосредственный.

29. Патент № 2725648 Российская Федерация, МПК 7 F02M 25/10 (2006.01). Способ подачи в ДВС с искровым зажиганием водоводородного топлива, водоводородное топливо, и устройство для его получения : № 2019127439 : заявл. 30.08.2019 : опубликовано: 03.07.2020 / Шарапов Н. Н., Мусин И. Г., Киямов Р. Х., Айдаров И. И. – 20 с. : ил. – Текст : непосредственный.

30. Сидоров М.И. Метод улучшения показателей работы дизеля подачей на впуск водородосодержащего газа : Дис. ... канд. технич. наук: 05.04.02 / Сидоров Михаил Игоревич ; Российский университет дружбы народов. – М., 2006. – 125 с.

31. Смирнов А.Ю. Улучшение эффективных и экологических показателей автотракторных дизелей с наддувом путем подачи метанола на впуске : Дис. ... канд. технич. наук: 05.04.02 / Смирнов Артем Юрьевич ; Санкт-Петербургский государственный аграрный университет. – Спб., 2009. – 114 с.

32. Современные технологии производства в промышленности: [сайт]. – Москва, 2019 – . – URL: <https://extxe.com/11839/vodorodnoe-toplivo> (дата обращения 16.06.2023). – Текст: электронный.

33. Тактак А.А. Улучшение рабочего процесса дизеля присадкой воды к топливу : Дис. ... канд. технич. наук: 05.04.02 / Тактак Абдулрахман Абдулразак ; Алтайский государственный технический университет им.И.И. Ползунова. – Барнаул, 2005. – 128 с.
34. Филатов А.С. Исследование влияния добавки эфир-альдегидной фракции этилового спирта в дизельное топливо на показатели работы дизельного двигателя : Дис. ... канд. технич. наук: 05.04.02 / Филатов Александр Сергеевич ; Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия. – Омск, 2002. – 131 с.
35. ФИПС : официальный интернет-сайт. – Москва, 2009 – . – URL: <https://www.fips.ru/publication-web/classification/mpk?view=list> (дата обращения 16.06.2023). – Текст: электронный.
36. Яндекс.Патенты : [сайт]. – Москва, 2019 – . – URL: <https://yandex.ru/patents> (дата обращения 16.06.2023). – Текст: электронный.
37. Akhilendra Pratap Singh, Nikhil Sharma, Ramesh Agarwal, Avinash Kumar Agarwal. Material Compatibility Aspects and Development of Methanol-Fueled Engines // Advanced Combustion Techniques and Engine Technologies for the Automotive Sector [Электронный ресурс]. – URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-0368-9_3. – С. – 37-51. (Дата доступа – 15.06.2023)
38. Mikulski M., Wierzbicki S., Ambrosewicz-Walacik M., Duda K. and Piętak A. (2016) Combustion of Gaseous Alternative Fuels in Compression Ignition Engines. Alternative Fuels, Technical and Environmental Conditions (Biernat K. (Ed.)), Poland, pp. 78-81. doi: 10.5772/60628
39. Matuszewska A. (2016) Microorganisms as Direct and Indirect Sources of Alternative Fuels. Alternative Fuels, Technical and Environmental Conditions (Biernat K. (Ed.)), Poland, pp.141-146. doi: 10.5772/62397
40. Neftegaz.ru : Информационно-аналитический портал : сайт. – Москва, 2000 – . – URL:<https://neftegaz.ru/tech-library/elektrooborudovanie> (дата обращения 16.06.2023). – Текст: электронный.

41. Reynolds M.A., Checkel M.D., Fraser R.A. A Case Study for Life Cycle Assessment (LCA) as an Energy Decision Making Tool: The Production of Fuel Ethanol from Various Feedstocks. SAE Technical Paper Series, 1998, № 982205, pp. 1-17.
42. Thomson R. V., Thorp J., Armstrong G., Katsoulakos P. The burning of emulsified fuels in diesel engines // Trans. Inst. Mar. Eng. – 1981. V.93. – pp. 19-25.
43. Thomson R. V., Katsoulakos P. S. The application of emulsified fuels in diesel engine designs: experimental results and theoretical predictions // Trans. Inst. Mar. Eng. – 1985. V.97. – p. 10.
44. Zhao Hua (2007) Natural gas HCCI engines. HCCI and CAI Engines for the Automotive Industry, England: Woodhead Publishing Limited, Cambridge, pp.365-372.

