

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 кафедры)

13.04.03 Энергетическое машиностроение

(код и наименование направления подготовки)

Энергетические комплексы и системы управления

(направленность (профиль))

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему Совершенствование экологических качеств дизеля
применением средств физико-химической активации процесса сгорания

Студент

Т.Н. Павлова

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

Д.А. Павлов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель программы

к.т.н., доцент Д.А. Павлов

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

(личная подпись)

« ____ » _____ 2019 г.

Допустить к защите

Заведующий кафедрой

к.т.н., доцент Д.А. Павлов

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

(личная подпись)

« ____ » _____ 2019 г.

Тольятти 2019

Содержание

Введение.....	4
1. Альтернативные виды топлива для ДВС.....	7
1.1. Водород как альтернативное топливо.....	7
1.2. Водородное топливо.....	8
1.3. Водород на Земле.....	8
1.4. Способы хранения водорода.....	12
2. Электролизёр.....	15
2.1. Его характеристики и применение.....	15
2.2. Виды электролизёров.....	17
3. Аналитический обзор влияния водорода на токсичность дизельного двигателя.....	21
4. Методика проведения и обработки результатов испытаний.....	23
4.1. Методика испытаний.....	23
4.2. Измерительное оборудование.....	25
4.3. Порядок проведения и объём испытаний.....	26
4.4. Расчётная оценка снижения массовых выбросов токсичных компонентов автобусами городского транспорта.....	32
4.5. Оценка погрешностей измерений.....	35
4.6. Разработка макетной системы снижения токсичности и её лабораторные испытания.....	38
5. Результаты испытаний и их анализ.....	43
5.1. Оценка влияния добавки водорода на мощностные и экономические показатели дизельного двигателя (КАМАЗ).....	55
5.2. Оценка влияния добавки водорода на мощностные показатели дизельного двигателя.....	55
5.3. Оценка влияния добавки водорода на экономические показатели дизельного двигателя.....	56

5.4. Оценка влияния добавки водорода на экологические показатели дизельного двигателя.....	60
5.5. Продукты неполного сгорания.....	61
5.6. Дымность ОГ и выбросы твёрдых частиц.....	62
5.7. Выбросы оксида азота NO _x	63
6. Анализ результатов испытаний и опыта эксплуатации системы.....	65
6.1. Анализ результатов испытаний (автобус).....	65
6.2. Обсуждение опыта эксплуатации и технологического обслуживания системы.....	66
6.3. Перечень необходимых доработок системы и ориентировочная (экспертная) её цена при серийном производстве.....	69
6.4. Предложения по внедрению системы.....	70
7. Программа экспериментальных исследований влияния добавок водорода на топливную экономичность и выбросы вредных веществ с отработавшими газами дизеля КАМАЗ.....	71
7.1. Основание для проведения испытаний.....	71
7.2. Цель проведения испытаний.....	71
7.3. Объект испытаний.....	71
7.4. Условия и методика проведения испытаний.....	71
Заключение.....	73
Список используемых источников.....	76

Введение

Развитие транспорта в городах создаёт проблему загрязнения окружающей среды выхлопными газами двигателей, которые составляют более половины от всех промышленных выбросов. Основным источником загрязнения воздуха - это автотранспорт. На долю городских автомобилей приходится почти 75% вредных выбросов. Автотранспортом выбрасывается в атмосферные слои более 77 тыс. тонн вредных веществ, из которых на долю окси углерода приходится 45 тыс. тонн, количество окислов азота – более 3 тыс. тонн. Почти 7 тыс. тонн представлены углеводородами. При этом около половины от этого количества составляют отработавшие газы (ОГ) от грузового транспорта, значительную часть которого составляют автобусы.

В связи с этим, весьма актуальной является проблема снижения уровня этих выбросов, которая может решаться несколькими путями.

Во-первых, это оснащение автобусного парка современными, малотоксичными двигателями. Во-вторых, обеспечение надлежащего текущего технического обслуживания, что по данным выполненных исследований позволяет снизить выбросы примерно в 2 раза. Третьим путём является разработка и применение различных специальных систем, позволяющих снизить количество вредных выбросов ДВС.

К системам снижения токсичности в первую очередь относятся получившие в настоящее время наибольшее распространение системы на базе эффекта нейтрализации отработавших газов (ОГ). Данные системы наиболее эффективны, освоены промышленностью и широко применяются. Вместе с тем им присущи и недостатки. Так данные системы эффективно работают только при поддержании стехиометрического состава топливовоздушной смеси (ТВС), что требует специального регулирования двигателя, усложняющего его конструкцию. При их применении ужесточаются требования к качеству топлива и существенно возрастает его расход.

Следует отметить, что несмотря на эти недостатки, способ нейтрализации в настоящее время является единственным промышленно освоенным способом, позволяющим выполнять установленные нормы по токсичности ОГ.

Известны и другие подходы к снижению количества вредных выбросов. В частности, проведение рабочего процесса ДВС на обеднённых смесях. При этом должна решаться проблема обеспечения устойчивого протекания процесса горения, что возможно осуществить путем применения добавок водорода. На данный момент получение водорода представляет некоторые сложности, в связи с чем более широко используются системы с малой подачей водорода. Автономные источники водорода в этом случае подойдут как нельзя лучше. Это можно осуществить на базе электролизёра или гидридных накопителей.

Перед нами была поставлена цель - разработать систему снижения токсичности автобусного транспорта на базе автономного источника водорода – электролизёра, оценка её эффективности при опытной эксплуатации и заключения о возможности её применения в условиях г. Тольятти.

Целью работы – экспериментально выявить степень влияния добавки водорода на основные показатели дизельного двигателя. Для этого необходимо было решить следующие задачи:

- сконструировать систему подачи водорода в дизельный двигатель в условиях моторного бокса;
- разработать методику проведения экспериментальных исследований;
- определить, как добавка водорода влияет на мощностные, экономические и токсические показатели двигателя:
 - а) для достижения практически значимых результатов по экономичности и экологичности двигателя, вычислить необходимое количество водорода;

б) применимо ли для автономных систем, основанных на современных и перспективных технологиях получения водорода, возможность использования добавок водорода.

1. Альтернативные виды топлива для двигателей внутреннего сгорания

В настоящее время ситуация в мире складывается таким образом, что, при значительном увеличении количества производимых автомобилей, всё больше загрязняется окружающий мир, в частности воздух. Это происходит по причине огромного количества выбрасываемых вредных веществ. В связи с чем всё активнее ведутся поиски альтернативного вида топлива. Во многих зарубежных странах всё большую популярность приобретает топливо, произведённое из растительного сырья.

Основная движущая сила автомобиля в настоящее время – это двигатель внутреннего сгорания. В связи с чем создание альтернативного вида топлива – единственный путь решения проблемы.

На сегодняшний день самым широко используемым ресурсом является, конечно, нефть. Однако, его запасы не безграничны. Нефть продолжает медленно, но верно подходить к концу. А, как всем нам известно, ресурс этот не возобновляемый. Поэтому уже сейчас по всему миру активно проводятся исследования по поиску альтернативного вида топлива.

1.1. Водород как альтернативное топливо

Наряду с истощением ископаемых топливных ресурсов, водород может стать прорывом в мировой энергетике. Применение водорода позволит значительно снизить количество вредных выбросов в окружающую среду, соответственно улучшится экологическая обстановка во всём мире. Кроме того, водород является эффективным аккумулятором энергии.

В настоящее время все производители автомобилей имеют так называемый «автомобиль будущего», который работает на водороде. Ряд предприятий предлагают также комбинированные варианты, где можно чередовать топливо (водород и бензин). Так же в некоторых странах два

вида топлива совмещают. Увеличение мощности двигателя, экологическая чистота и уменьшение расхода топлива – всё это даёт данное совмещение.

1.2. Водородное топливо

Самый распространённый элемент во Вселенной – это, несомненно, водород. Но его не так легко найти в чистом виде. Его запасы достаточно велики. Каждую секунду на Солнце происходит синтез, в результате которого образуются тонны водорода. Уже миллиарды лет его запасы не иссякают, а Солнце продолжает быть самой яркой звездой во Вселенной[11].

Человек живёт в этой среде. Практически все виды топлива загрязняют окружающую среду, исключая водород. Высаживаются сотни деревьев для очистки воздуха, но это капля в море. Продукты горения, выделяемые автомобилем, очень сильно загрязняют окружающую среду. Дышать таким воздухом становится опасно для здоровья. Провоцируются многие заболевания, а выздоровление в таких условиях далеко не гарантировано. Если мы на минуту представим, что все автомобили мира перешли на водородное топливо и перестали загрязнять окружающую среду, то наша планета вступит в эпоху процветания и новой жизни.

В настоящее время учёные всего мира бьют тревогу и разрабатывают проекты по внедрению использования водорода в обычную жизнь. Но, к сожалению, пока реализацию таких проектов можно встретить довольно редко.

1.3. Водород на Земле

Немало водорода и на Земле. На долю его атомов приходится 1 % лито- и гидросферы. Если же сравнить распространённость в земной коре атомов всех образующих её химических элементов, то на долю водорода придётся около 17 % от их общего числа. Правда, в земных условиях водород встречается преимущественно в связанном состоянии. Он составляет 11,19% (по массе) самого распространённого на Земле вещества

— воды; входит в состав органических соединений, слагающих угли, природный газ, нефть, глины, а также организмы животных и растений.

В атмосфере Земли содержится очень незначительное количество водорода (0,0001 % по числу атомов).

Источниками поступления водорода в воздушную оболочку Земли являются:

а) Мировой океан, в глубинах которого протекают процессы преобразования органического вещества, сопровождающиеся выделением водорода;

б) кратеры вулканов;

в) некоторые фотохимические (протекающие под действием света) реакции в атмосфере.

Показательно, что в Северном полушарии содержание в атмосфере водорода выше, чем в Южном. Это обусловлено тем, что в этой части земного шара сильно развиты промышленность и транспорт, неизменным результатом работы которых является изменение химического состава окружающей среды.



Рис. 1.1 - Концепт-кар

Ряд факторов, ограничивающих широкое применение водорода, свидетельствуют в пользу того, что переход на новое топливо будет происходить не очень быстрыми темпами. Продажи пионерской Toyota Mirai на водородных топливных элементах, начавшиеся в 2015 году, приблизились лишь к рубежу 3000 штук — и это на огромном рынке, в который входят не только Япония, но и США, ЕС, ОАЭ. Очевидно, что водород как топливо будет еще долго соседствовать как с традиционными углеводородами, так и с литий-ионными аккумуляторами (в электромобилях). При этом опережающими темпами водородные технологии смогут развиваться в отдельных наиболее перспективных нишах, например, в сфере электрических БПЛА. Дело в том, что КПД водородного топливного элемента очень высок, за счет того что энергия, выделяемая при соединении водорода с кислородом, утилизируется непосредственно в электричество, без значительных потерь в виде тепла, как это происходило бы при сжигании топлива в цикле Карно[3]. Используя энергию топлива по максимуму, БПЛА с топливным элементом может оставаться в воздухе гораздо дольше, чем беспилотник с сопоставимой взлетной массой, но питающий двигатель от широко применяемых литий-ионных аккумуляторов.

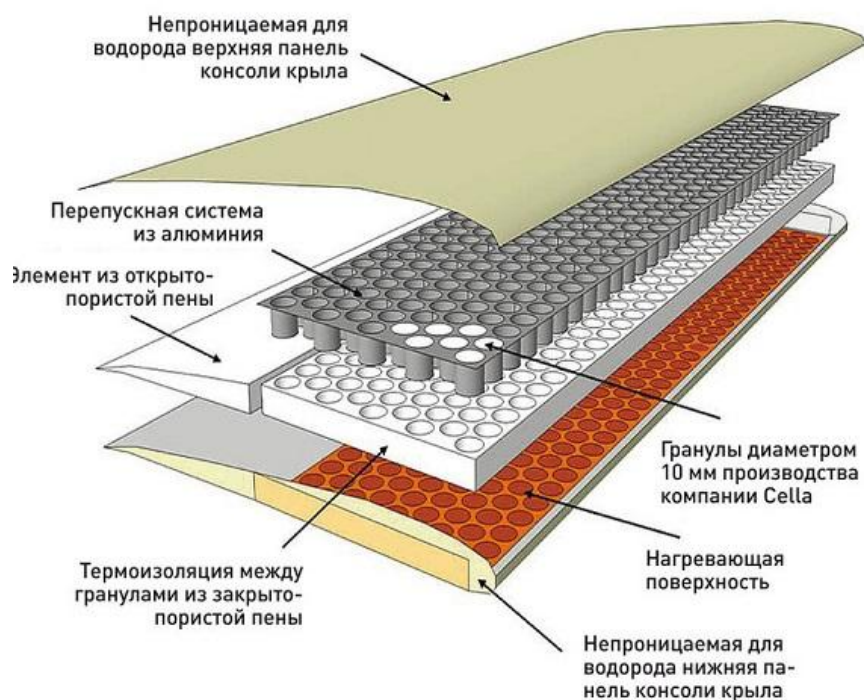


Рис. 1.2 -Схема размещения гранул «твёрдого водорода» в крыле БПЛА

Водородная бортовая система обладает очень хорошим ВВТЭ и эффективно работает, но с появлением на борту сжатого баллонного водорода возникли проблемы немалого веса и габарита. Кроме того, сохраняется вероятность утечки газа, что небезопасно. Новейшие сверхпрочные материалы и технологии до конца эту проблему не решили. Чтобы иметь на борту водорода побольше и в более легкой системе хранения, пробовали перейти на сжиженный при температуре -253°C водород, плотность которого втрое выше плотности водорода, сжатого до стандартных для баллонных систем давлений 300–350 атм., что могло бы увеличить энергоемкость системы [13]. Но проблемы с сосудом Дьюара, термоизоляцией, заправкой и т. п. от такой идеи заставили отказаться. Выход был найден, когда вспомнили о твердых металлических гидридах. В гидриде водород настолько плотно запакован, что о каких-либо его просачиваниях речи не идет. Поэтому «твердый» водород — это серьезный аргумент в решении проблемы безопасности и людей, и техники.

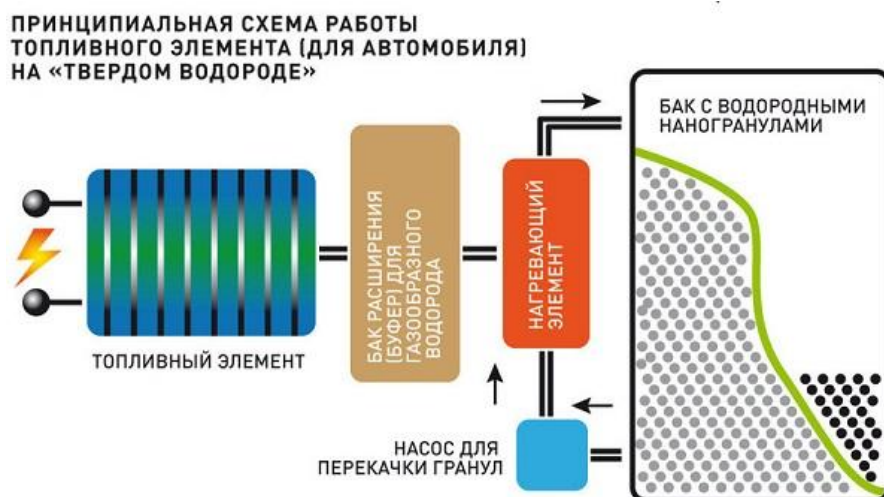


Рис. 1.3 -Принципиальная схема работы топливного элемента на «твёрдом водороде».

1.4. Способы хранения водорода

В зависимости от того, какой объём у производства и какой объём водорода ему необходим для нормального функционирования, существуют различные системы хранения водорода – так называемые хранилища.

В связи с низкой плотностью водорода, ёмкости для хранения водорода нужны достаточно большие и связанные либо с высоким давлением, либо с очень низкими температурами. Также способы хранения водорода можно разделить на группы в зависимости от агрегатного состояния.

- 1) хранение в подземных хранилищах (газообразный водород);

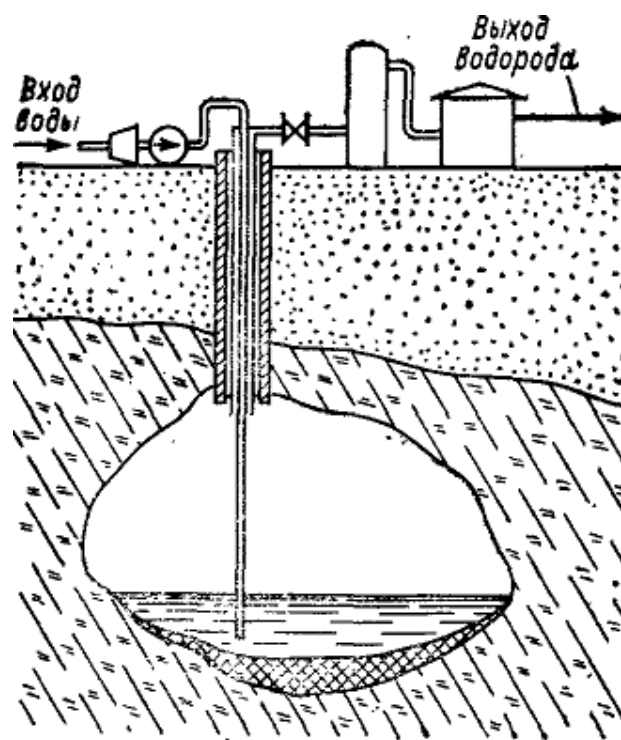


Рис. 1.4 -Подземное хранилище водорода.

В области хранения под давлением самый распространённый способ – это хранение водорода в баллонах. Существуют баллоны со стандартным давлением (50 л, 20 МПа), контейнеры высокого давления стационарного типа (более 20 МПа) или контейнеры низкого давления сферического типа (объём более 30000 м³, 1,2-1,6 МПа).



Рис. 1.5 -Контейнеры низкого давления сферического типа.

- 2) хранение в интерметаллических соединениях;
- 3) криосорбционный метод хранения (пенометаллы, цеолиты, полимерные материалы и т.д.);

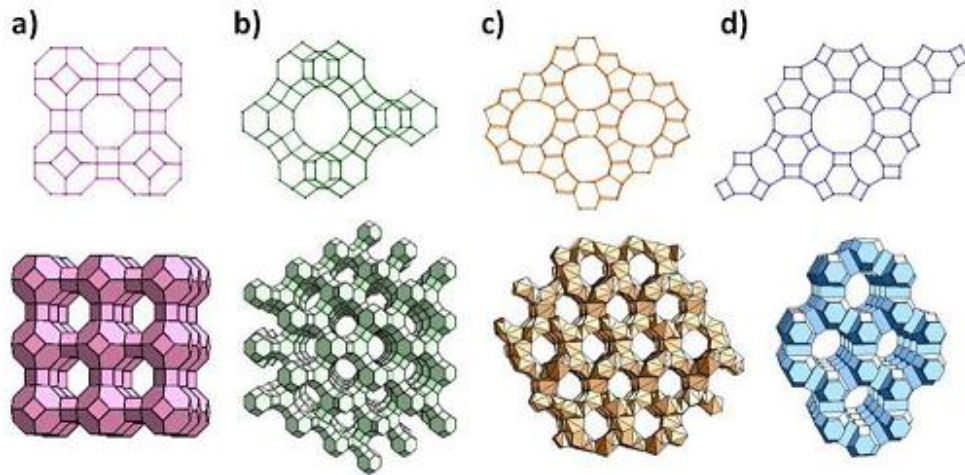


Рис. 1.6 -Пенометаллы.

- 4) хранение жидкого водорода;



Рис. 1.7 -Схема сосуда криобиологического (дьюара)

- 5) хранение твёрдого водорода в тройной точке.

2. Электролизёр

2.1. Его характеристики и применение

Так называют устройство для одноимённого химического процесса, которому требуется внешний источник питания. Конструктивно этот аппарат представляет собой заполненную электролитом ванну, в которую помещены два и более электрода. Основная характеристика подобных устройств – производительность.



Рис. 2.1 - Промышленная стационарная электролизная установка, вырабатывающая 40 м^3 водорода в час

Что касается остальных характеристик, то они зависят от конкретного типа устройства и сферы применения. Например, когда осуществляется электролиз воды, на КПД установки влияют следующие параметры:

1) уровень напряжения (минимального электродного потенциала) – от 1,8 до 2. Меньшее значение не запустит процесс, а большее приводит к чрезмерному расходу энергии, идущей на нагрев электролита. Если в качестве источника используется блок питания, например, на 14 вольт, имеет смысл разделить ёмкость ванны пластинами на 7 ячеек[28].

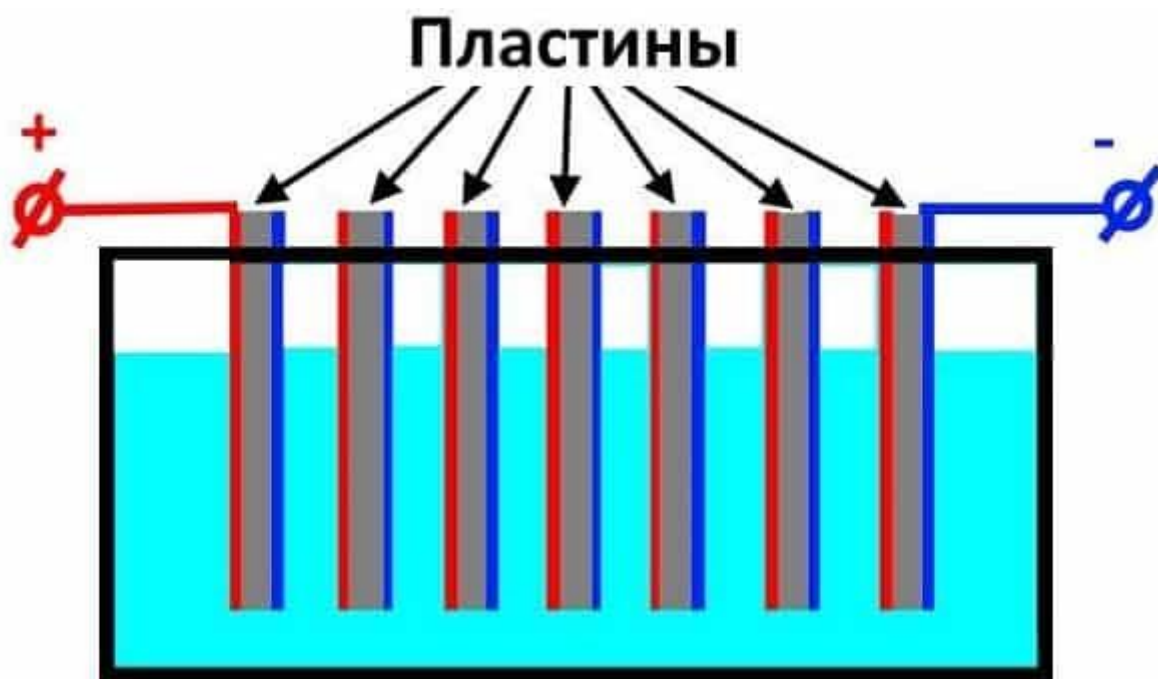


Рис. 2.2 - Расположение пластин в ванне электролизёра

Таким образом, подавая на выходы 14 вольт, мы получим два вольта на каждой ячейке, при этом на пластинах с каждой стороны будут разные потенциалы.

Электролизёры, где используется подобная система подключения пластин, называются сухими.

2) Расстояние между пластинами (между катодным и анодным пространством) – чем оно меньше, тем меньше будет сопротивление и, следовательно, больший ток пройдёт через раствор электролита. Это приведёт к увеличению выработки газа.

3) Размеры пластины (имеется в виду площадь электродов) прямо пропорциональны току, идущему через электролит. А, значит, также оказывают влияние на производительность.

4) Концентрация электролита и его тепловой баланс.

5) Характеристики материала, используемого для изготовления электродов (золото – идеальный материал, но слишком дорогой, поэтому в самодельных схемах используется нержавейка).

6) Применение катализаторов процесса и т.д.

Принцип работы устройства демонстрирует приведённый ниже рисунок. Источник постоянного напряжения подключен к погруженным в раствор электролита электродам. В результате через него начинает проходить ток, напряжение которого выше точки разложения молекул воды.

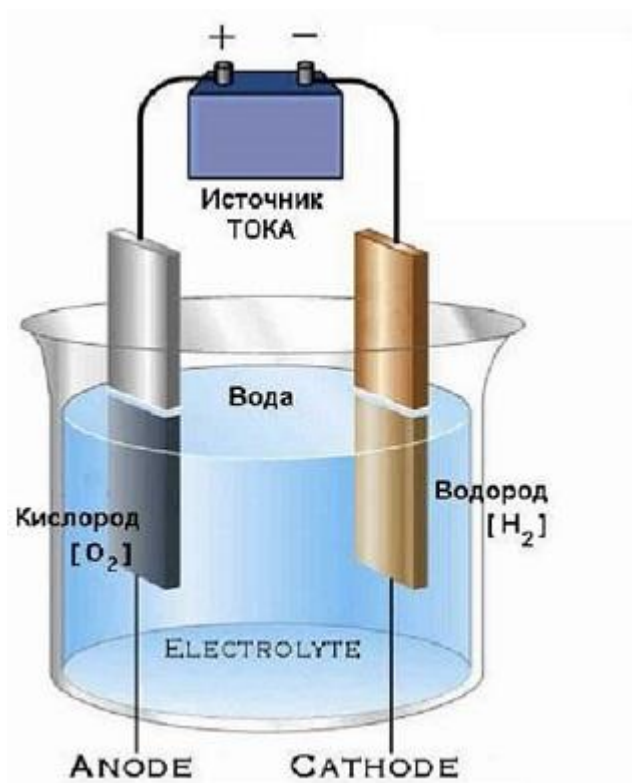


Рис. 2.3 - Конструкция простого электролизёра

В результате этого электрохимического процесса катод выделяет водород, анод – кислород. В соотношении 2 к 1.

2.2. Виды электролизёров

Сухие.

Конструкция прибора была представлена выше. Особенность данного вида заключается в том, что, манипулируя количеством ячеек, можно запитать устройство с напряжением, существенно превышающим минимальный электродный потенциал.

Проточные.

Конструкция включает в себя ванную с электродами «А», полностью залитую раствором, и бак «D».

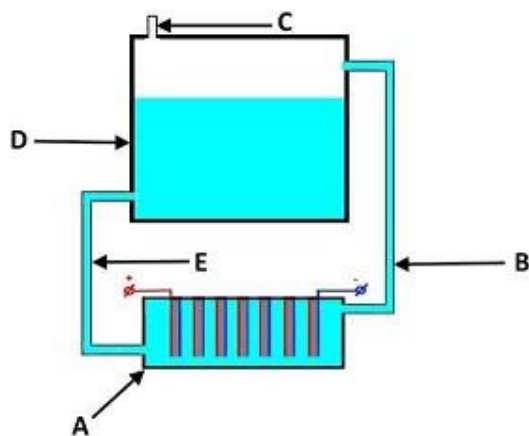


Рис. 2.4 - Конструкция проточного электролизёра

Принцип работы:

- газ вместе с электролитом выдавливается в ёмкость «D» через трубу «B» в ходе электрохимического процесса;
- отделение от электролитного раствора газа происходит в баке «D», газ выводится через выходной клапан «C»;
- через трубу «E» электролит возвращается в гидролизную ванну.

Мембранные.

Использование твёрдого электролита (мембраны) на полимерной основе - основная особенность устройств этого типа.

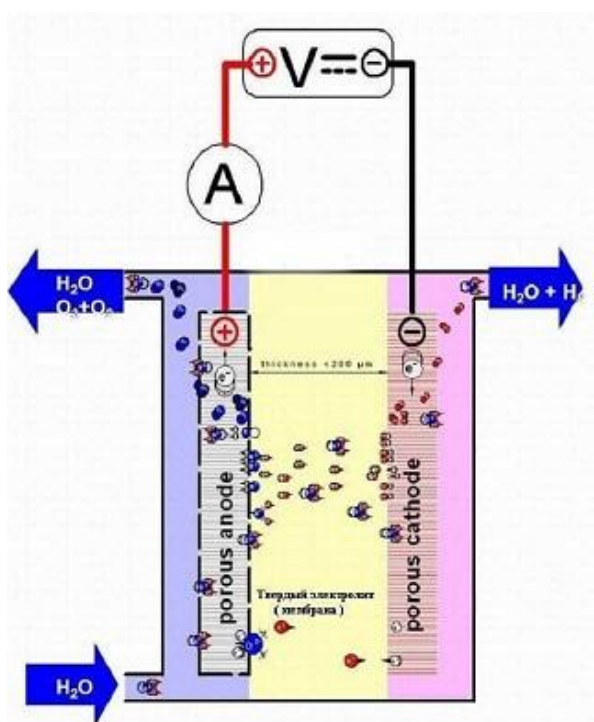


Рис. 2.5 - Электролизёр мембранного типа

Двойное назначение мембраны – это основная особенность таких устройств. Она не только переносит протоны и ионы, но и разделяет электроды и продукты электрохимического процесса.

Диафрагменные.

Пористую диафрагму используют в тех случаях, когда недопустима диффузия продуктов электролиза между электродными камерами. Керамика, асбест или стекло – всё это может служить для неё материалом. Иногда можно использовать полимерные волокна или стеклянную вату.

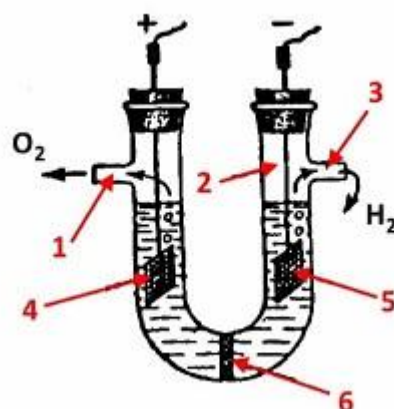


Рис. 2.6 -Конструкция диафрагменного электролизёра

- 1 – выход для кислорода;
- 2 – U-образная колба;
- 3 – выход для водорода;
- 4 – анод;
- 5 – катод;
- 6 – диафрагма.

Щелочные.

В дистиллированной воде невозможно провести электрохимический процесс. В этом случае концентрированный раствор щёлочи (использование соли нежелательно, так как при этом выделяется хлор) используется в качестве катализатора. В результате чего большую часть электрохимических устройств для расщепления воды можно назвать щелочными.

Пищевая сода (NaHCO_3) разъедает электрод, поэтому советуют использовать гидроксид натрия (NaOH). Но при этом у соды имеются преимущества: можно использовать железные электроды, не выделяются вредные вещества. Тем не менее один существенный недостаток сводит на нет все её несомненные достоинства – не более 80 грамм на литре концентрация в воде [34]. В результате чего у электролита снижается морозостойкость и проводимость тока. Если в тёплое время года с первым ещё можно смириться, то второе требует увеличения площади пластин электродов. Размер конструкции в результате чего, естественно, увеличивается.

3. Аналитический обзор влияния водорода на токсичность дизельного двигателя

Ближайшая перспектива развития машиностроения – это применение водорода в качестве основного топлива, кроме того и в качестве добавки к бензину (дизельному топливу). Водород обладает несомненным рядом преимуществ в качестве моторного топлива: широкие концентрационные пределы сгорания; высокая скорость сгорания, что повышает КПД двигателя; высокий коэффициент диффузии.

В случае применения водорода как добавки к топливу автомобильных двигателей, уровень токсичности ОГ может значительно снизиться, а также повысить его экономичность, в зависимости от характеристик источника водорода. Величина получаемых эффектов по большей части зависит от количества подаваемого водорода.

Наиболее существенным преимуществом применения водорода в свете рассматриваемой нами проблемы – снижение токсичности обработанных газов ДВС городских автобусов – является то, что применение водорода в любых количествах приводит к улучшению сгорания топлива. И, как следствие, снижению вредных выбросов. В любом случае нагрузка на внешнюю среду значительно снижается.

Несмотря на явные преимущества применения водорода, имеются и недостатки. Главным образом, это отсутствие эффективных технологий получения и хранения водорода. Например, широко известные способы хранения с помощью баллонных или криогенных систем не могут считаться приемлемыми по причине их технологической сложности и безопасности.

Определённый прогресс достигнут в технологии получения водорода электролизом воды с использованием ионообменных мембран. Рядом предприятий выпускаются электролизеры с различной производительностью: от нескольких до сотен литров в час. Потребляемая

энергия в данном случае измеряется порядком сотен ватт при достаточно высоком КПД.

Так как данное количество водорода уже оказывает определенное влияние на работу двигателя, представляется целесообразным выполнение работ по оценке применения системы на основе электролизёра.

В случае применения данной системы, определённая часть энергии двигателя будет расходоваться на работу электролизёра, что увеличит нагрузку на двигатель и, соответственно, расход топлива. Поэтому задача, главным образом, заключается в поиске оптимальных соотношений расхода водорода, топлива и получаемого суммарного эффекта. В данном случае – снижение вредных выбросов. Но, так как применение водорода в любом случае снижает процент вредных выбросов в окружающую среду, применение данной системы является вполне обоснованным. Вопрос заключается в количественной оценке эффекта и анализе затрат на производство и эксплуатацию такой системы.

Объектами испытаний являются дизельный двигатель автобуса, снабжённый опытной системой снижения токсичности, а также дизельный двигатель автомобиля «КамАЗ». Условия функционирования, конструкция двигателя и всех его систем разработаны заводом-изготовителем и соответствуют ТУ по эксплуатации.

4. Методика проведения и обработки результатов испытаний

4.1. Методика испытаний

Для разработки системы снижения токсичности необходимо определение некоторых исходных параметров: потребная производительность по водороду, т.е. расход водорода, закон регулирования его подачи. Это позволит выбрать и определить потребные характеристики генератора водорода.

В моторном боксе ОАО «КамАЗ» проводились экспериментальные исследования. Бокс оборудован по требованиям, соответствующим ГОСТ Р 41.49 – 2003 (Правила ЕЭК ООН №49), в том числе индукторным тормозом и измерительным оборудованием.

Была создана модельная система, где в качестве источника водорода использовался баллон высокого давления. Целью данной работы являлась экспериментальная оценка минимально потребного расхода водорода, необходимого для получения существенного эффекта. Выполненные приближенные расчеты показали, что минимальный потребный расход должен составлять величину порядка 1000 л/час, т.е. примерно 100 г/час.

На основании полученных данных может быть заказан электролизёр с необходимыми характеристиками.

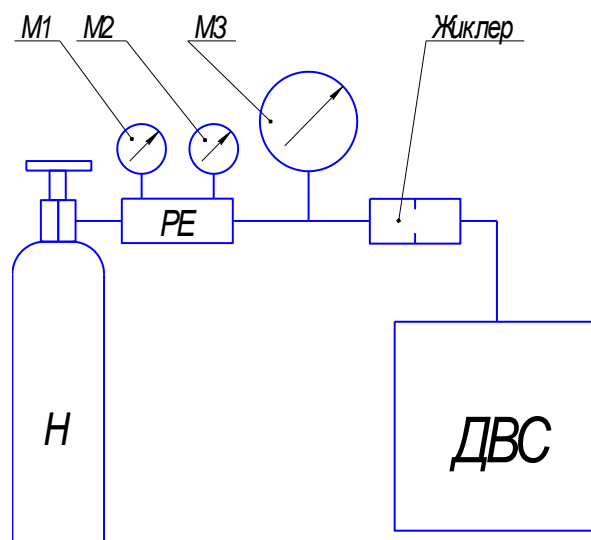
Далее была разработана макетная система снижения токсичности на базе данного электролизёра, пригодной к установке и испытаниям на автобусе. Данный этап выполнялся в лабораторных условиях с использованием специального силового устройства, обеспечивающего заданные параметры работы электролизёра (напряжение, силу тока, тепловой режим).

Заключительный этап представлял собой проведение испытаний разработанной системы на автобусе в условиях реальной эксплуатации. Например, при разной температуре окружающей среды.

На рис. 4.1 представлена схема системы.

Система подачи водорода включает в себя: баллон с водородом (Н), манометры (М1-М3), редуктор (РЕ), жиклёр, соединительная арматура.

Рассмотрим подробнее как работает система. Через редуктор (РЕ) и тарированный жиклерводород, из баллона высокого давления (Н), подавался во впускной коллектор двигателя в сечение, которое расположено непосредственно за охладителем наддувочного воздуха. Эффективное



Н- баллон с водородом, М1-М2 - манометры, РЕ – редуктор

Рисунок 4.1 – Схема системы подачи водорода в ДВС

сечение жиклера определяет при этом расход водорода. Давление перед жиклером поддерживалось на уровне $\Delta P = 0,35 - 0,5$ МПа для исключения влияния изменения давления во впускном коллекторе двигателя на расходные характеристики системы подачи водорода. Гарантированный критический перепад давления на жиклере при этом обеспечивался в полном объёме [45]. В таблице 1 представлены расходные характеристики 3-х жиклеров.

Таблица 1

Жиклер	№1	№2	№3
Расход водорода G_H , кг/ч	0,135	0,19	0,42

4.2. Измерительное оборудование

При проведении испытаний производились измерения параметров двигателя, предусмотренные ГОСТ Р 41.49 – 2003 (Правила ЕЭК ООН №49).

В таблице 2 приведены наименования средств измерений и их основные характеристики, входящие в состав стенда.

Таблица 2 - Средства измерений и их основные характеристики[33]

Наименование средств измерений	Тип, фирма	Класс точности или погрешность	Диапазон измерений
1	2	3	4
Канал измерения крутящего момента: - тензодатчик	-	не более ± 2	(0 ÷ 190) кг·с
Канал измерения числа оборотов: - датчик числа оборотов	-	$\pm 1,5$	(0 ÷ 4000) мин ⁻¹
Измеритель давления газа	Манометр МТП-160	$\pm 1,5 \%$	(0 ÷ 4,0) кгс/с ²
Канал измерений температуры всасываемого воздуха: - преобразователь - термопара	Ш711/1И ХК	$\pm 2 \%$ $\pm 2 \%$	(0 ÷ 1000) °С (-200 ÷ 800) °С
Канал измерений температуры охлаждающей жидкости: - преобразователь - термометр сопротивления	Ш79 ТСП	$\pm 0,4 \%$ $\pm 0,1 \%$	(0 ÷ 150) °С (0 ÷ 120) °С
Канал измерений температуры масла: - преобразователь - термометр сопротивления	Ш711/1И ТСП	$\pm 2 \%$ $\pm 0,1 \%$	(0 ÷ 1000) °С (0 ÷ 120) °С
Канал измерений температуры топлива: - преобразователь - термометр сопротивления	Логометр Л-64 ТСМ	$\pm 1,5 \%$ $\pm 0,1 \%$	(0 ÷ 50) °С (-50 ÷ 150) °С
Канал измерений температуры ОГ (2 точки): - преобразователь - термопара	Ш711/1И ХА	$\pm 2 \%$ $\pm 2 \%$	(0 ÷ 1000) °С (-200 ÷ 1300) °С

Измеритель атмосферного давления воздуха	Барометр-анероид БАММ-1	1,0	(80 ÷ 106) кПа
Измеритель давление масла в двигателе	Манометр ЭКМ	± 1,5 %	(0 ÷ 1,0) МПа
Измеритель разряжения на впуске	Пьезометр водяной	± 2,0 мм.вод.ст	(0 ÷ 1500) мм.вод.ст.
Измеритель давление наддувочного воздуха	Манометр образцовый (МО)	± 0,4 %	(0 ÷ 250) кПа
Измеритель давления во впускном коллекторе	Моновакуметр	± 1,0 %	(-1,0 ÷ 3,0) кгс/с ²
Измеритель давления картерных газов	Пьезометр водяной	± 2,0 мм.вод.ст	(0 ÷ 600) мм.вод.ст.
Измеритель влажности окружающего воздуха	Психометр аспирационный МВ-4М	0,2	(10 ÷ 100) % относ. влаж.
Состав отработавших газов	Газоанализатор фирма «HORIBA»	± 1,0 %	(0 ÷ 10000) ppm

4.3. Порядок проведения и объем испытаний

Для проведения испытаний была разработана специальная программа (см. пункт 7), которая включает в себя снятие необходимых характеристик двигателя и подготовку стенда к испытаниям.

Последовательность снятия характеристик ДВС на исследуемых режимах была следующей. Запускался и прогревался двигатель автобуса. Редуктором и жиклером устанавливается необходимый расход водорода. Измеряемые параметры регистрируются, в данном случае дымность ОГ. Измерение дымности проводилось по ГОСТ 21393-85 дымомером типа КИД-2 на режиме свободного ускорения[10].

Первое измерение с целью определения исходной величины дымности проводилось без подачи водорода. Дальнейшие измерения осуществлялись при непрерывной подаче водорода по впускной коллектор

при следующих значениях расхода, определенных на основании результатов исследований, проведенных на кафедре «Тепловые двигатели» и проэкстраполированных на исследуемый двигатель пропорционально литражу: 0,1; 0,2; 0,3 и 0,4 кг/час. Последнее испытание проводилось без подачи водорода, что позволяло оценить степень возвращения двигателя в исходный уровень по дымности.

Результаты испытаний представлены на рисунках 4.2 и 4.3. На графиках отмечены точки, которые получены при повторении исходного режима ($H=0$) в течение одного опыта (значение, полученное после прекращения подачи водорода), т.е. наглядно показывающие соответствие дымности в начале и при окончании измерений.

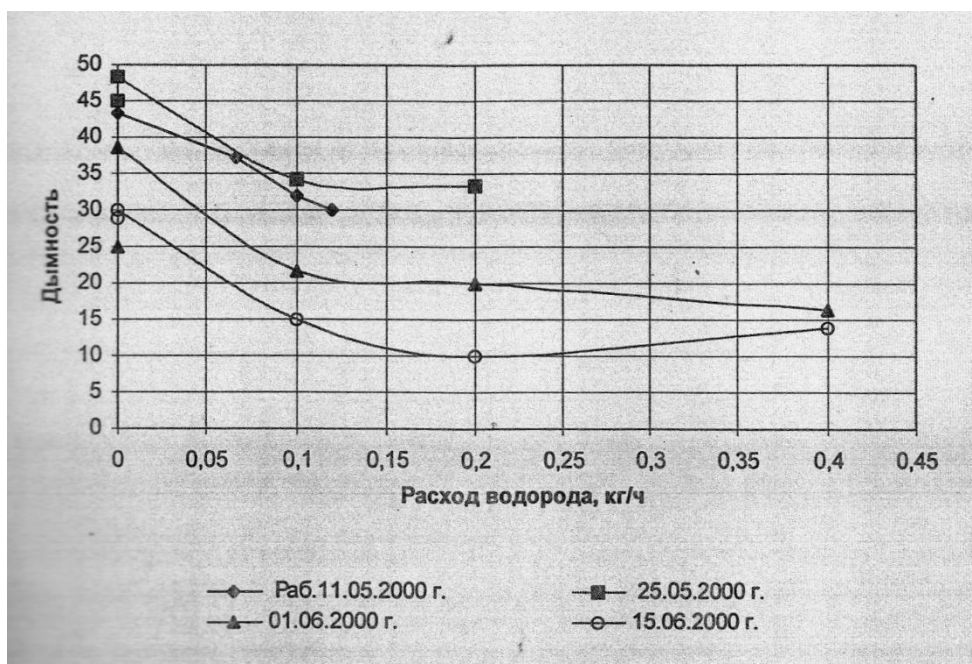


Рис. 4.2 - Изменение дымности двигателя автобуса при подаче водорода (режим свободного ускорения)

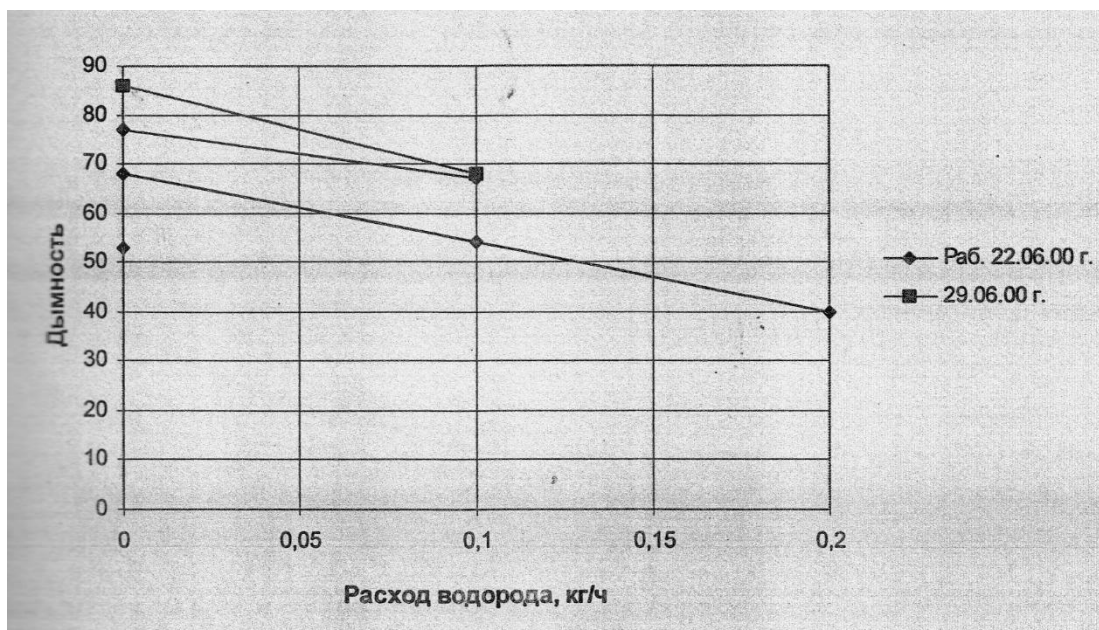


Рис. 4.3 - Изменение дымности при испытаниях на автобусе

На графиках можно увидеть, что при подаче водорода происходит снижение дымности, причём это снижение носит нелинейный характер. При увеличении расхода водорода до 0,1 кг/час наблюдается максимальный эффект снижения дымности. При дальнейшем увеличении подачи водорода его действие уменьшается, что объясняется дополнительным обогащением ТВС.

Таким образом, для дизельного двигателя автобуса целесообразно принять расход водорода порядка 0,1 кг/час.

Вместе с тем в процессе испытаний наблюдалось следующее обстоятельство: повторяющееся устойчивое возвращение дымности к исходному значению при отключении подачи водорода. Однако, при дальнейшем проведении эксперимента, было выявлено, что при отключении подачи водорода либо сохраняется низкий уровень дымности, либо он незначительно повышается, оставаясь существенно ниже исходного. Причиной этого может быть следующее:

- во-первых, длительная работа на режиме прогазовок (свободное ускорение) сама по себе способствует снижению дымности, вследствие простой продувки и самоочистки, в частности глушителя;

- во-вторых, водород, способствуя более полному сгоранию топлива при длительном воздействии на процесс сгорания, приводит к тому же эффекту;

Принимался во внимание и тот факт, что при измерении дымности данным прибором (КИД-2) имеют место значительные случайные погрешности[42]. В таких условиях достоверность результатов может подтверждаться повторными экспериментами и исключением из рассмотрения грубых погрешностей.

С целью получения более достоверных данных в дальнейшем была предусмотрена пауза, длительностью 5 минут (работа на холостом ходу), при проведении измерений дымности. Это требовалось для прихода двигателя в исходное состояние. Также предусматривались повторные эксперименты до получения повторяющихся результатов.

На рис. 4.3 приведены графики изменения дымности, полученные на автобусе, имевшим большой её исходный уровень. При этом предполагалось, что подача водорода в этом случае приведет к большему снижению дымности выхлопных газов. Однако, результаты показали, что снижение дымности при равных расходах водорода в этом случае менее значительно, чем при подаче в двигатель, имеющий допустимый для эксплуатации её уровень. А минимальный потребный уровень расхода увеличивается и составляет более 0,2 кг/час.

По аналогичной методике были проведены исследования действия водорода на двигатель автомобиля КАМАЗ, целью которых была оценка изменения числа оборотов. В результате: добавка водорода в количестве 0,1 кг/час кратковременно и в небольшой мере повышает обороты двигателя, а затем, под действием регулятора, они снижаются до первоначального уровня. Данное явление ярко свидетельствует о влиянии водорода на рабочий процесс.

Пуск двигателя проводился при температуре, влажности и давлении окружающей среды, характерной для моторного бокса. Для двигателя

устанавливалась рабочая температура. При работе двигателя на дизельном топливе снималась исходная (базовая) характеристика, когда на двигателе устанавливался нужный режим работы. Водород в необходимом количестве подавался во впускной коллектор двигателя. Коррекция режима работы двигателя проводилась по мере подачи водорода. В итоге проводились все необходимые измерения по достижению установленного режима.

В таблице 3 представлены результаты работы.

Приняты следующие обозначения:

A – 25 – режим работы двигателя, соответствующий $n = 1180$, мин⁻¹,
N_e = 31 л.с.

A-100 - режим работы двигателя, соответствующий $n = 1180$, мин⁻¹,
N_e = 119 л.с.

C – 25 – режим работы двигателя, соответствующий $n = 1730$, мин⁻¹,
N_e = 46 л.с.

C – 100 – режим работы двигателя, соответствующий $n = 1730$, мин⁻¹,
N_e = 169 л.с.

D – 25 - режим работы двигателя, соответствующий $n = 900$, мин⁻¹,
N_e = 39 л.с.

УВСХ – условная внешняя скоростная характеристика

ESC – 13-ти ступенчатый цикл испытаний по ГОСТ Р 41.49 – 2003[35]

Первичные результаты испытаний в виде таблицы представлены ниже.

Таблица 3 – Выполненные работы

№	Дата	Вид работ	Примечания
1	20.06.07	Ввоз оборудования на территорию ОАО «КАМАЗ».	
2	21.06.07	Монтаж системы подачи водорода. Опрессовка магистралей высокого давления.	

3	22.06.07 – 25.06.07	Пуско-наладочные работы системы подачи водорода и ДВС.	Двигатель КАМАЗ 740.62-240 заменен на КАМАЗ 740.65-280. Причина – высокое давление картерных газов.	
4	26.06.07	УВСХ двигателя без подачи водорода.		
		Регулировочная характеристика при добавке водорода		
		<i>Режим</i>	G_{H_2} кг/ч	
		А-100	0	
			0,19	
			0,42	
		А-25	0	
			0,19	
0,42				
ХХ	0			
5	27.06.07	Снятие дополнительных точек для регулировочной характеристики при добавке водорода		
		А-100	0	
			0,42	
		А-25	0	
			0,42	
		Регулировочные характеристики по углу опережения впрыска топлива		
		УОВТ 0°		
		ХХ	0	
			0,19	
			0,42	
		А-100	0	
			0,42	
		УОВТ 4°		
		ХХ	0	
			0,19	
			0,42	
		А-100	0	
			0,42	
		Испытательный цикл ESC без добавки водорода		Регулировка ТНВД
		6	28.06.07	УВСХ повтор, без добавки водорода
Испытательный цикл ESC с добавкой водорода $G_{H_2} = 0,42$ кг/ч				

		УВСХ с водородом $G_{H_2} = 0,42$ кг/ч	
		С-100	0
			0.42
		С-25	0
			0.42
		Повторный испытательный цикл ESC без добавки водорода	Отмечена высокая концентрация СН на режимах А-25, В-25, С-25.
		Снятие дополнительных точек регулировочной характеристики при добавке водорода на режиме ХХ, $G_{H_2} = 0,135$ кг/ч	
7	29.06.07	Регулировочная характеристика при добавке водорода на режиме D-25	
		Проверка влияния водорода путем последовательного включения и отключения подачи водорода с фиксацией СО, СН, NO _x .	
		Вывоз оборудования с территории ОАО «КАМАЗ»	

4.4. Расчётная оценка снижения массовых выбросов токсичных компонентов автобусами городского транспорта

Результаты проведенных испытаний позволили определить требуемую производительность генератора водорода, равную 0,1 кг/час (1000 л/час) и величину эффекта, получаемого при применении данной системы, оценённому по объёмному составу или дымности ОГ. Вместе с тем, экологический эффект системы предполагает (предусматривает) определение снижения выбросов, выраженных в массовых единицах. Поэтому именно их определение позволит наиболее полно оценить эффект предполагаемой системы. Кроме того, такая оценка позволит принять решение о целесообразности продолжения работ по созданию предлагаемой системы снижения токсичности.

Отметим, что расчёт массовых выбросов ДВС может быть произведён только в приближённом виде, основываясь на опытных данных. Но для сравнительной оценки такой способ вполне подходит.

Среднее значение выбросов сажи дизельными двигателями составляют порядка 0,1-1,0 г/м³ отработавших газов. Если принять показатель равным 0,5 г/м³ и задать время работы двигателя, количеством автобусов можно определить суммарные выбросы для случаев работы с системой и без системы. При этом необходимо ещё одно априорное решение – доля работы двигателя на режиме разгона или холостого хода, для которых определялись приведённые выше показатели и которую примем равную 40% от полного времени работы двигателя.

Формула для расчётов будет иметь следующий вид:

$$M_{\text{сажи}} = 0,5 * G_{\text{ОГ}} * T * N * 0,4$$

где 0,5 – принятая масса выбросов сажи двигателя в единице объёма ОГ, $G_{\text{ОГ}}$ – объёмный ОГ (в м³), который можно приближённо определить через расход воздуха, потребляемый двигателем, T – принятое время работы двигателя, N – количество двигателей (автобусов), 0,4 – доля работы двигателя по времени на данном режиме. Результаты приведены на диаграммах (рис.4.4).

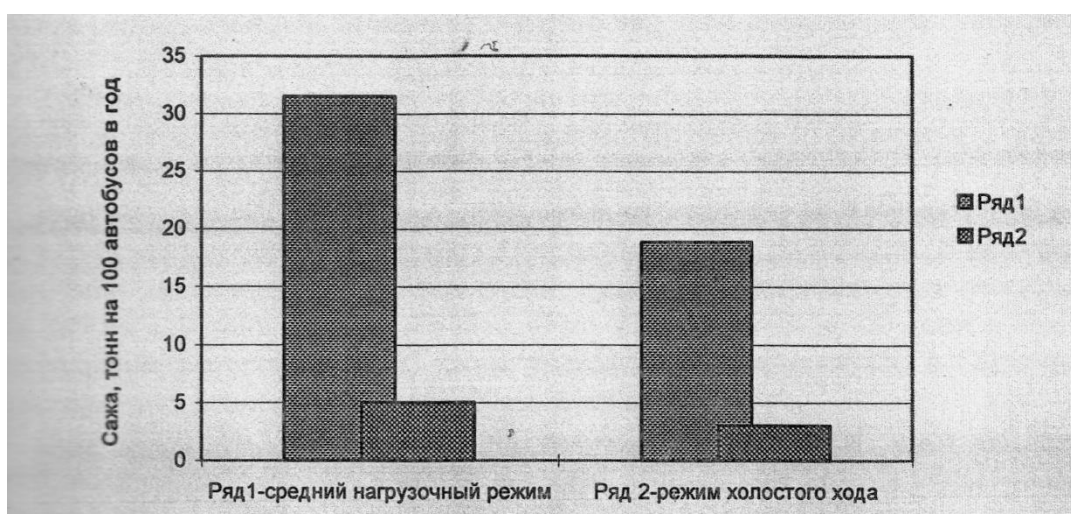


Рис. 4.4 - Расчётные величины выбросов сажи дизельными автобусами

Ознакомившись с результатами, делаем вывод, что при работе на холостом ходу (ХХ) выбросы сажи при применении системы снижаются с 5 до 3 тонн на 100 автобусов в год. При численности автобусов в городе примерно 200 единиц снижение выброса сажи составляет 4 тонны в год при работе только на холостом ходу (ХХ).

Расчёты для других режимов носят ещё более приближённый характер[42]. В результате снижение общих выбросов составит на 200 автобусов в год примерно 20-25 тонн (расчётное количество сажи без применения системы составляет около 65 т).

Коэффициент избытка воздуха, определялся по формуле:

$$\alpha = \frac{G_{\text{в}}}{G_{\text{т}} \cdot l_{0\text{т}} + G_{\text{н}} \cdot l_{0\text{н}}},$$

где: $l_{0\text{т}}$ и $l_{0\text{н}}$ - соответственно, стехиометрическое соотношение дизельного топлива и водорода при горении в воздухе;

$G_{\text{в}}$ – расход воздуха, кг/ч;

$G_{\text{т}}$ – расход топлива, кг/ч;

$G_{\text{н}}$ – расход водорода, кг/ч.

Формула подведённого с топливом количества теплоты с учетом добавки водорода:

$$Q = \frac{G_{\text{т}} \cdot H_{\text{и т}} + G_{\text{н}} \cdot H_{\text{и н}}}{3600}, \quad (2)$$

где: Q – количество теплоты, подведенной с топливом к двигателю, МДж/с;

$H_{\text{и т}}$ – теплотворная способность дизельного топлива, МДж/кг;

$H_{\text{и н}}$ – теплотворная способность водорода, МДж/кг.

По методике ОАО «КамАЗ» проводился расчёт других параметров двигателя в соответствии с ГОСТ Р 41.49 – 2003, в частности расчет массовых расходов выбросов вредных веществ осуществлялся по следующим формулам[22]:

Массовые выбросы NO_x , г/ч

$$\text{NO}_{x\text{mass}} = 0,001587 \text{ NO}_x G_{02},$$

Массовые выбросы CO, г/ч

$$CO_{\text{mass}} = 0,000966 CO G_{O_2},$$

Массовые выбросы CH, г/ч

$$CH_{\text{mass}} = 0,000479 CH G_{O_2},$$

где NO_x, CO, CH соответственно, объемные выбросы токсичных компонентов, ppm;

G_{O_2} – массовый расход отработавших газов, определяемый по формуле:

$$G_{O_2} = G_v + G_m + G_H,$$

G_v - массовый расход воздуха через двигатель, кг/ч;

G_m - массовый расход дизельного топлива, кг/ч;

G_H - массовый расход водорода, кг/ч.

4.5. Оценка погрешностей измерений

ГОСТ Р 41.49 – 2003 предусмотрены относительные погрешности измерений величин. Они принимались равными значениям, установленным данным ГОСТом.

Точность измерения некоторых показателей двигателя не предусмотрена ГОСТ Р 41.49 – 2003. К примеру, одного из основных факторов, определяющих эффективность работы двигателя - погрешность определения коэффициента избытка воздуха, а также расхода водорода.

Далее представлен порядок определения этих погрешностей.

Формула результирующей абсолютной погрешности:

$$\Delta = \Delta_c + \Delta_{сл},$$

где Δ_c – систематическая погрешность, которая не исключена;

$\Delta_{сл}$ – случайная составляющая погрешности измерений.

Формула не исключённой систематической погрешности:

$$\Delta_c = k \sqrt{\sum_{i=1}^m Q_i},$$

где Q_i – граница i -ой не исключённой систематической погрешности;
 k – коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью β , и равный 1,1 при $\beta = 0,95$.

Основная погрешность измерительных средств и субъективная погрешность принимались в качестве не исключённых систематических погрешностей. Субъективная определялась по паспортным данным типа используемых устройств, а основная – данных на средства измерений.

Формула случайной составляющей погрешности:

$$\Delta_d = \frac{S \cdot t}{\sqrt{n}},$$

где t – коэффициент (квантиль) Стьюдента, который имеет прямую зависимость от принятой доверительной вероятности и количества проведенных опытов;

S – среднеквадратическое отклонение;

n – количество результативных наблюдений (повторных опытов).

Среднеквадратическое отклонение определялась по формуле:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}},$$

где X_i – i -ый результат измерений,

\bar{X} – среднееарифметическое значение, определяемое как

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

Отношение, по которому определялась результирующая погрешность:

$$\phi = \frac{\Delta_c \sqrt{n}}{S}$$

Суммарная погрешность находится построением композиции распределений случайных и не исключенных систематических погрешностей, рассматриваемых как случайные величины. Если расчетная величина ϕ находится в диапазоне $0,8 < \phi < 8$:

$$\Delta = S^{\cdot} \cdot K,$$

где K – коэффициент, который зависит от соотношения случайной и не исключённой систематической погрешностей;
 S^{\cdot} - оценка результата измерения как суммарного среднеквадратического отклонения.

Формулы величин K и S^{\cdot} [11]:

$$K = \frac{\Delta_c + \Delta_{cl}}{\frac{S}{\sqrt{n}} + \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{Q_i^2}{3}}}$$

$$S^{\cdot} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{Q_i^2}{3} + \frac{S^2}{n}}$$

Отношение абсолютной погрешности к измеренному значению – это результирующая относительная погрешность.

Относительная погрешность измерения для расхода водорода составляет не более $\delta_{G_H} = \pm 5\%$ по результатам расчётов вышеуказанной методики.

Методика оценки косвенных измерений бралась за основу определения относительной погрешности коэффициента избытка воздуха. По представленной ниже формуле определяется величина абсолютной предельной погрешности с принятой надёжностью (доверительной вероятностью), равной $\beta = 0,95$:

$$\Delta = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f(x_1, x_2, \dots, x_m)}{\partial x_i} \right)^2 t_{\alpha} s_i^2}, \quad (3)$$

где: $f(x_1, x_2, \dots, x_m)$ - функция, определяющая искомую величину по результатам прямых измерений, x_1, x_2, \dots, x_m - её аргументы;

t_α - квантиль распределения Стьюдента;

s_i - оценка дисперсии i -го прямого измерения;

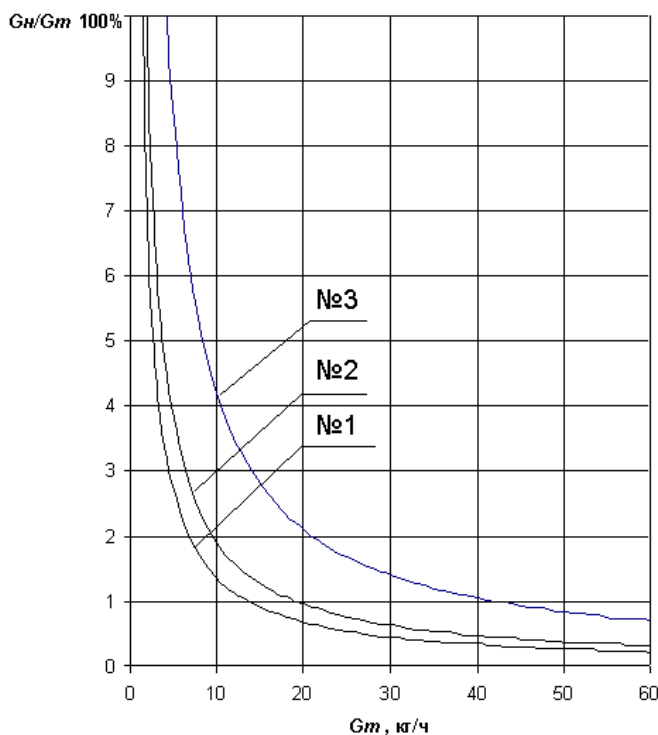
m - количество аргументов функции.

Выражение для абсолютной погрешности позволяют получить дифференцирование выражения 1 в соответствии с формулой:

$$\Delta_\alpha = \sqrt{\left(\frac{1}{G_m \cdot l_{0m} + G_n \cdot l_{0n}}\right)^2 \cdot t_\alpha S_\alpha^2 + \left(\frac{l_{0m} \cdot G_\alpha}{G_m \cdot l_{0\alpha} + G_n \cdot l_{0n}}\right)^2 \cdot t_\alpha S_\alpha^2 + \left(\frac{l_{0n} \cdot G_\alpha}{G_m \cdot l_{0m} + G_n \cdot l_{0n}}\right)^2 \cdot t_\alpha S_n^2}$$

Формула определения относительной погрешности:

$$\delta_\alpha = \frac{\Delta_\alpha}{\alpha}$$



№1 – расход водорода $G_n = 0,135$, кг/ч; №2 – расход водорода $G_n = 0,19$, кг/ч; №3 – расход водорода $G_n = 0,42$, кг/ч;

Рисунок 4.5 - Массовое отношение водород – дизельное топливо

- генератор водорода (электролизёр);
- производительность по водороду – 1000 л/ч;
- напряжение питания 26 ± 2 В;
- потребляемая мощность не более 1,5 кВт.

По итогам произведенных расчётов было получено, что суммарная относительная погрешность определения α в диапазоне изменений измеряемых величин находится в пределах $\delta_\alpha = 3 - 5 \%$.

4.6. Разработка макетной системы снижения токсичности и её лабораторные испытания.

Исходными данными для разработки макетной системы являются следующие показатели:

В процессе разработки электролизёра, исходя из стоимости и габаритов, было принято решение заказать устройство производительностью 300 литров водорода в час.

С учётом данных ограничений, разработанная система должна была быть не менее эффективна, чем модельная.

Водород аккумулировался в накопительную ёмкость под небольшим ($0,5 \text{ кг/см}^2$) давлением с последующим дозированным её расходом во время начала движения автобуса. Полученные результаты показали, что ёмкость порядка 30 литров уже обеспечивает подачу водорода с расходом $0,1 \text{ кг/час}$ в течение 3 мин. Этого вполне достаточно для эффективного снижения дымности при начале движения, когда сажи образуется больше всего.

При накоплении водорода до заданного давления происходит его перепуск во впускную систему. В результате повышается полнота сгорания и уменьшается, соответственно, количество вредных выбросов при стационарной работе двигателя.

На рис. 4.6 приведена блок-схема системы, реализующей предложенный алгоритм.

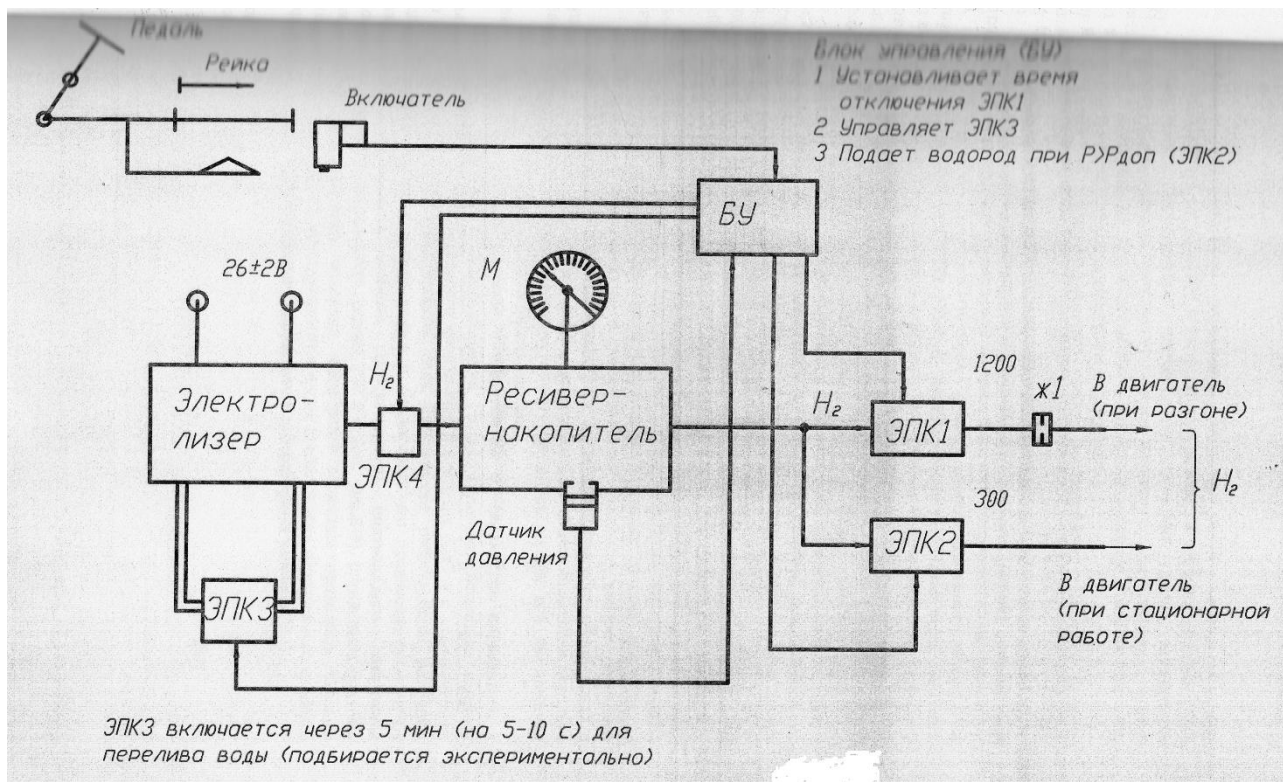


Рис. 4.6 – Блок-схема системы, реализующей данный алгоритм

Система подачи водорода состоит из электролизёра, накопительной ёмкости, электронного блока управления, электропневмоклапанов (ЭПК), датчика давления, жиклера и соединительных трубопроводов.

Накопительной ёмкостью служит стандартный автомобильный баллон для хранения сжиженного природного газа ёмкостью 60 л.

Электронный блок управления (БУ) разработан и изготовлен ВЭИ НТЦ (г. Тольятти) в рамках технического задания по данному договору (принципиальная схема БУ приведена в приложении). В качестве ЭПК и датчика давления применены стандартные изделия. БУ вырабатывает временную последовательность команд работы электролизёра, управляя клапанами перелива и сброса давления. По сигналу с датчика положения акселератора обеспечивает подачу водорода с задаваемой длительностью и расходом. Ограничивает, посредством специального датчика, давление в накопительной ёмкости. Сигналы о работе соответствующего элемента системы визуализируются посредством включения светодиодов, расположенных на блоке.

Принцип работы системы. Электролизёр постоянно вырабатывает водород, который поступает в накопительную ёмкость. При начале движения автобуса (после остановки) специальный датчик положения педали акселератора подаёт сигнал, посредством которого блок управления открывает ЭПК подачи водорода, обеспечивающий его расход 1000 л/час в течение заданного времени (это около 3-5 с). При дальнейшем переключении передач, т.е. движении педали акселератора, происходит периодическое включение данного клапана и, соответственно, подача водорода в двигатель, что позволяет снизить токсичность именно в местах скопления пассажиров (на остановках и перекрестках).

Следует отметить, что именно режим приёмистости, ускорения является наиболее экологически неблагоприятным режимом. В данном случае вредных выбросов образуется больше всего, в частности – повышенная дымность.

Для ограничения давления в накопительной ёмкости служит специальный клапан, работающий под управлением датчика давления, настроенного на предельное давление $P_{и}=0,35-0,4$ кг/см² (избыточное)[10]. Сигнал датчика давления подаётся в блок управления, который управляет работой клапана, обеспечивающего сброс давления. Водород в этом случае подаётся в двигатель, что снижает выбросы вредных веществ и улучшает экономичность при постоянной скорости движения.

Главным вопросом являлось обеспечение постоянного равенства уровней воды в бачках электролизёра. Это напрямую связано с работоспособностью системы. Такая система проще, а, соответственно, и дешевле системы, работающей при поддержании в бачках некоторого, повышенного по отношению к атмосферному давлению, давления.

Для решения этого вопроса был установлен специальный ЭПК перелива воды (см. схему), работающий от блока управления. Это позволило обеспечить равный уровень воды в бачках электролизёр.

Первичная отладка системы и определение её параметров проводилась в лабораторных условиях с использованием соответствующего источника питания постоянного тока, обеспечивающего напряжение 26 ± 2 V с подключением его к промышленной электрической сети. В процессе работы были получены характеристики прогрева электролизёра и зависимость его производительности от напряжения и времени работы. Заявленная зависимость по водороду подтверждена (300 л/ч), определены пределы регулирования по расходу водорода, подобраны величины проходных сечений жиклеров (водородного и кислородного) и время срабатывания перепускного клапана, необходимое для перелива воды в стационарных лабораторных условиях.

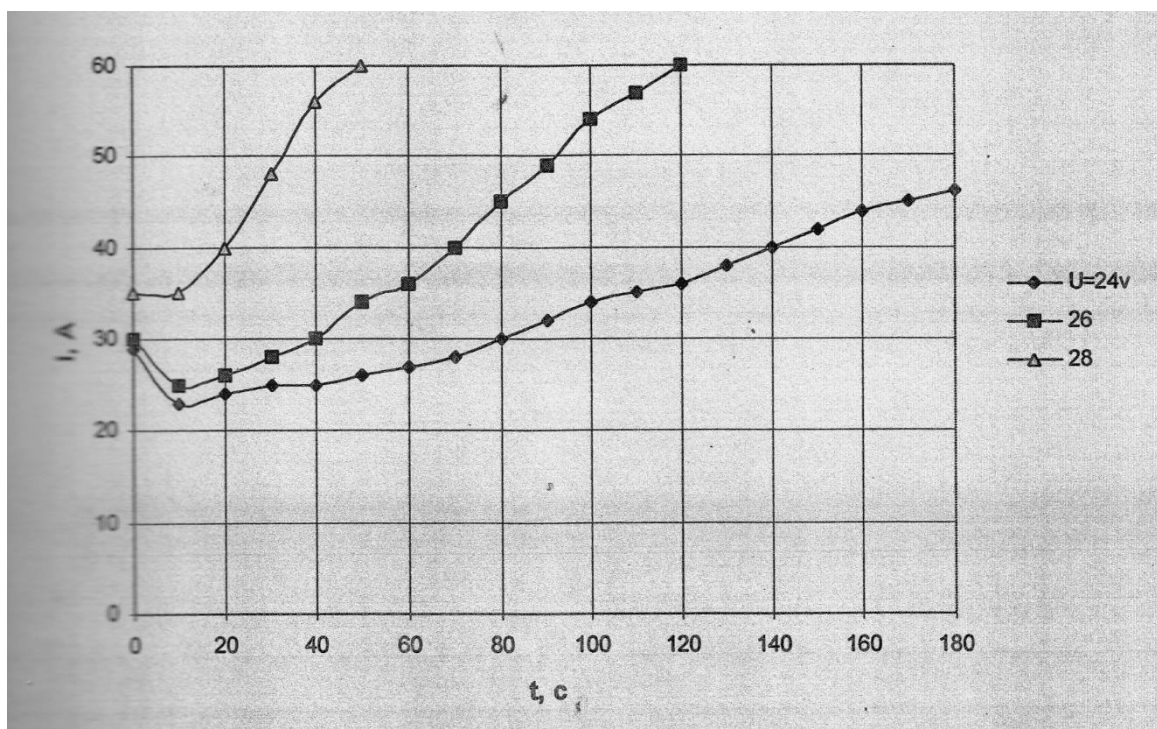


Рис. 4.7 -Изменение тока, потребляемого электролизёром, при различных величинах напряжения

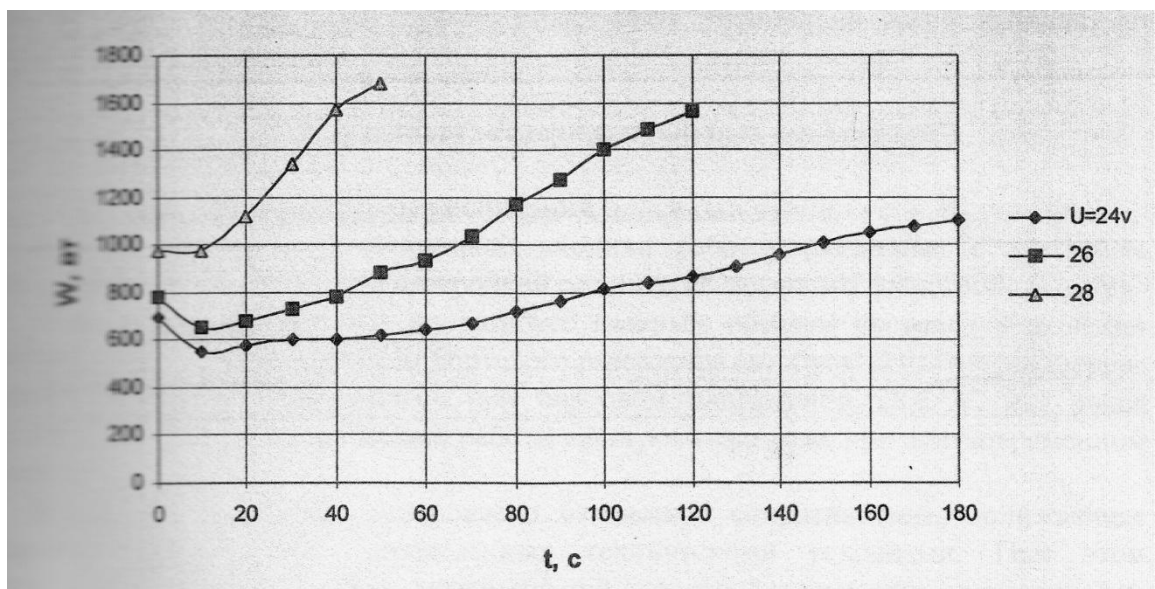


Рис. 4.8 - Изменение мощности, потребляемой электролизёром, при постоянных величинах напряжения

5. Результаты испытаний и их анализ

В объём отладочных испытаний входили работы, связанные с монтажом системы на автобусе, отладкой и настройкой режимов её заданного функционирования.

Отладка работы системы на автобусе, главным образом, заключалась в решении вопросов питания электролизёра от бортового генератора автобус. Первое включение системы производилось при бортовом напряжении 28,6 V, что выше допустимого и привело к нарушению работы электролизёра даже при кратковременном включении.

В связи с этим было установлено балластное сопротивление, понижающее напряжение до значений, определённых техническими условиями. При этом одновременно решалась задача максимальной производительности электролизёра, которая существенно зависит от напряжения (рис.4.7 и 4.8).

Так же следует отметить, что были зарегистрированы существенные колебания напряжения в бортовой сети автобуса. Ещё одним вопросом при

отладочных испытаниях стала настройка времени срабатывания клапана подачи водорода в условиях движения автобуса по городскому маршруту.

В результате пробных поездок было определено оптимальное время его открытия – это 3,5-4 с. Кроме того было получено, что время открытия клапана перелива воды должно составлять менее 25 с, которое было заложено при проектировании системы. Решение данного вопроса потребовало частичного изменения элементной базы блока управления, в результате выполнения которого возможно установление необходимого для перелива времени.

Оценка дымности ОГ дизельного двигателя производилась по методике ГОСТ 21393-75 с использованием дымомера типа КИД-2.

Результаты испытаний приведены в табл. 4.

№ испытания	Длительность подачи водорода, с			Примечание Дата
	0	3,5	5,0	
1	20		5	15.01.01 г.
2	20		10	
3	17		38	
4	29		25	
5	18			
	Сред.=21		Сред.=10	
1	6	0		23.01.01 г. Т _{дв} =70 ^o С
2	20	0		
3	25	10		
4		5		
	Средн.=17	Средн.=4		

1	22			23.01.01 г.
2	0			(после
3	0			поездки)
	Средн.=7			$T_{дв}=75^{\circ}C$

При измерении дымности имеют место достаточно существенные погрешности. Это обусловлено тем, что при измерениях регистрируется не количество сажи, а связанное с её наличием изменение оптической плотности ОГ. Кроме того, имеет место быть и случайная составляющая. Поэтому данные, приведённые в таблице, имеют достаточно большой разброс.

Графики и таблицы основных результатов испытаний для двигателя КАМАЗа приведены ниже. Характеристики двигателя без добавки водорода (базовые) и с добавкой водорода приведены на рисунках Б1-Б5.

Жиклером, имеющим определенную расходную характеристику, определялось количество подаваемого водорода в процессе испытаний. Это необходимо отметить особо. По итогам испытаний, на различных режимах было неодинаковым процентное отношение водорода к топливу, впрыскиваемое в ДВС. Процентное изменение массового соотношения водород – дизельное топливо при использовании различных жиклеров представлено на рис. 4.5 для удобства дальнейшего анализа.

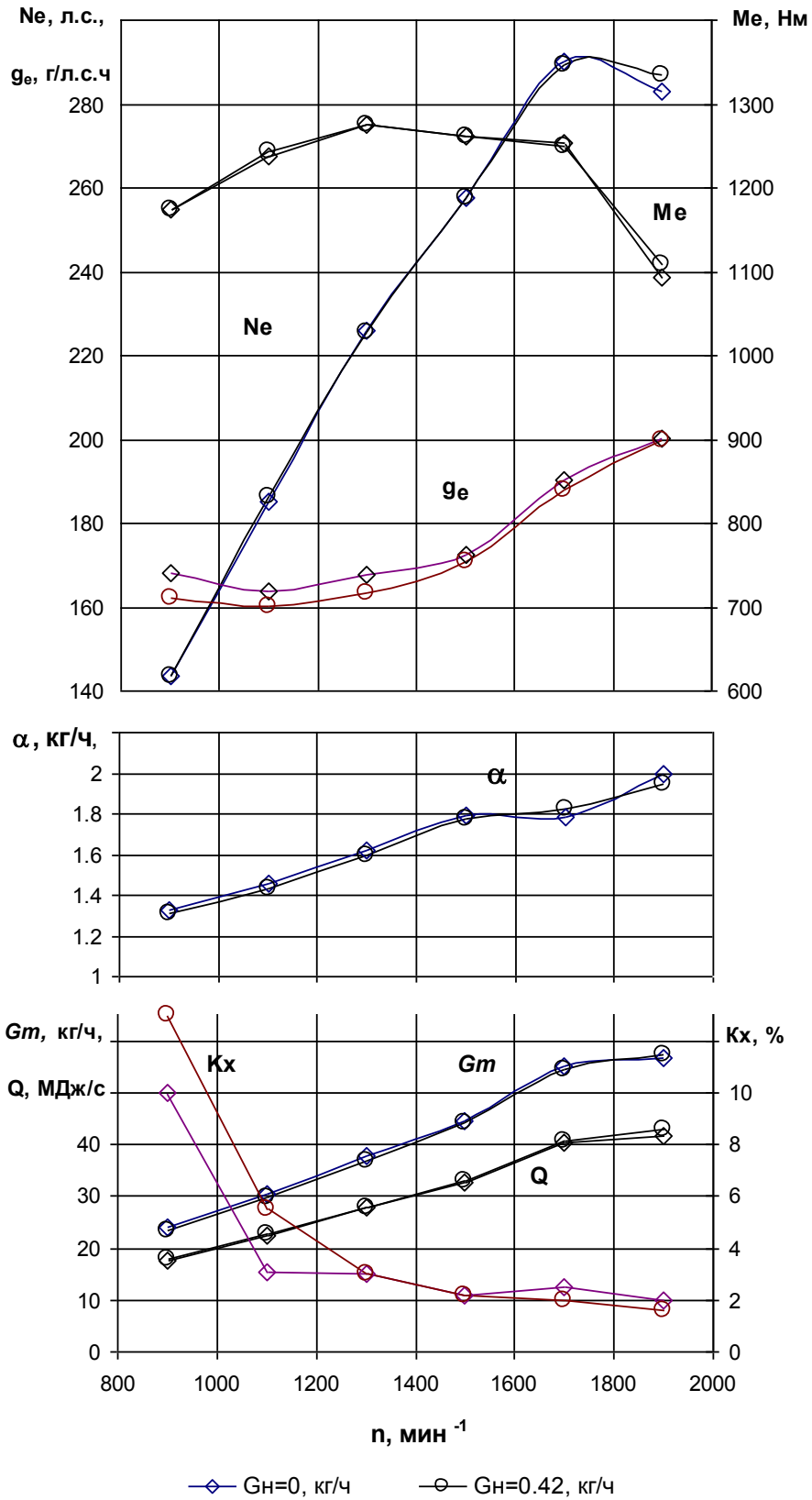


Рисунок Б1 – Условная внешняя скоростная характеристика двигателя КАМАЗ 740.62 – 280

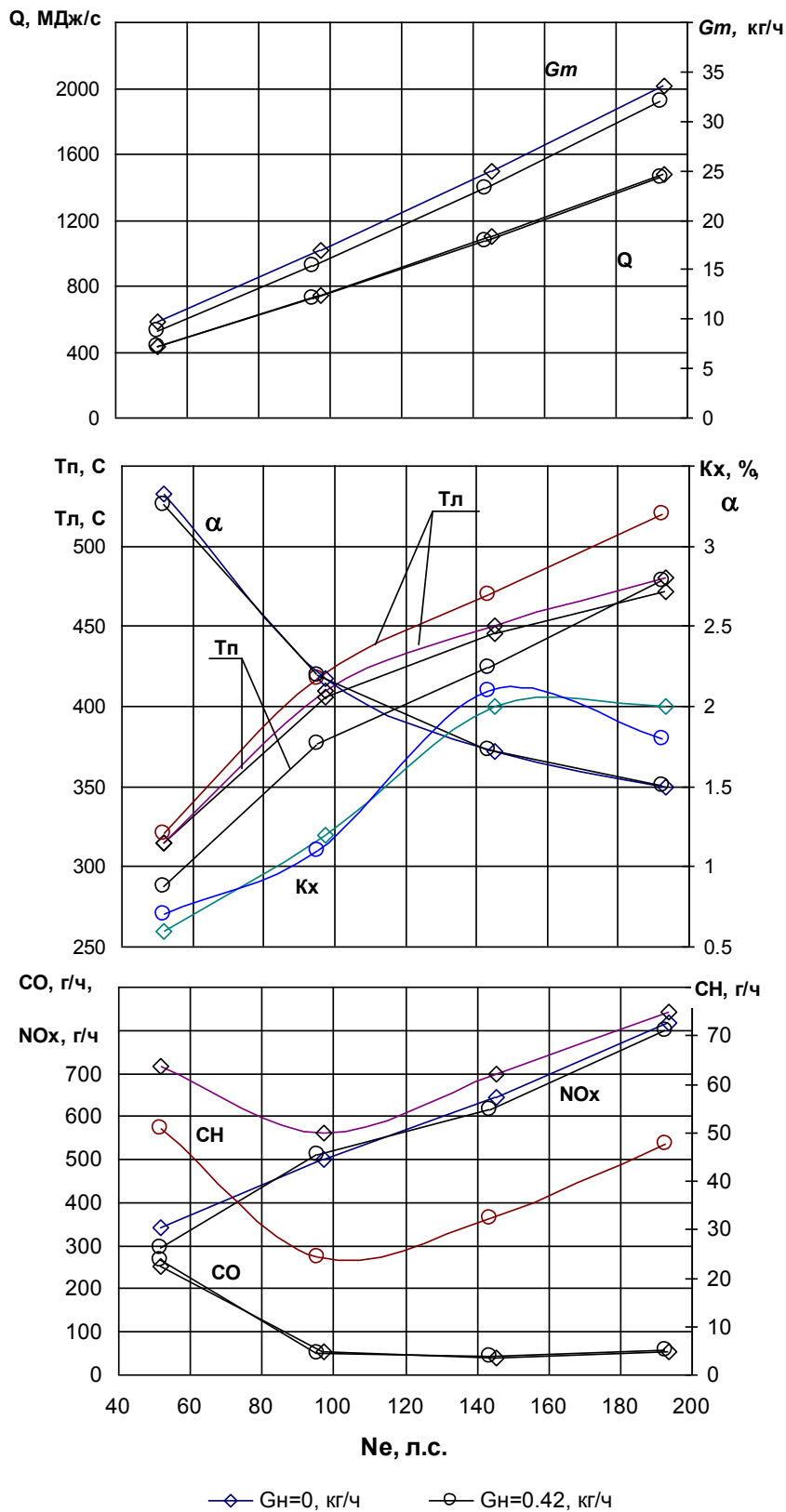


Рисунок Б2 – Нагрузочная характеристика двигателя КАМАЗ 740.62 – 280, $n = 1180 \text{ мин}^{-1}$

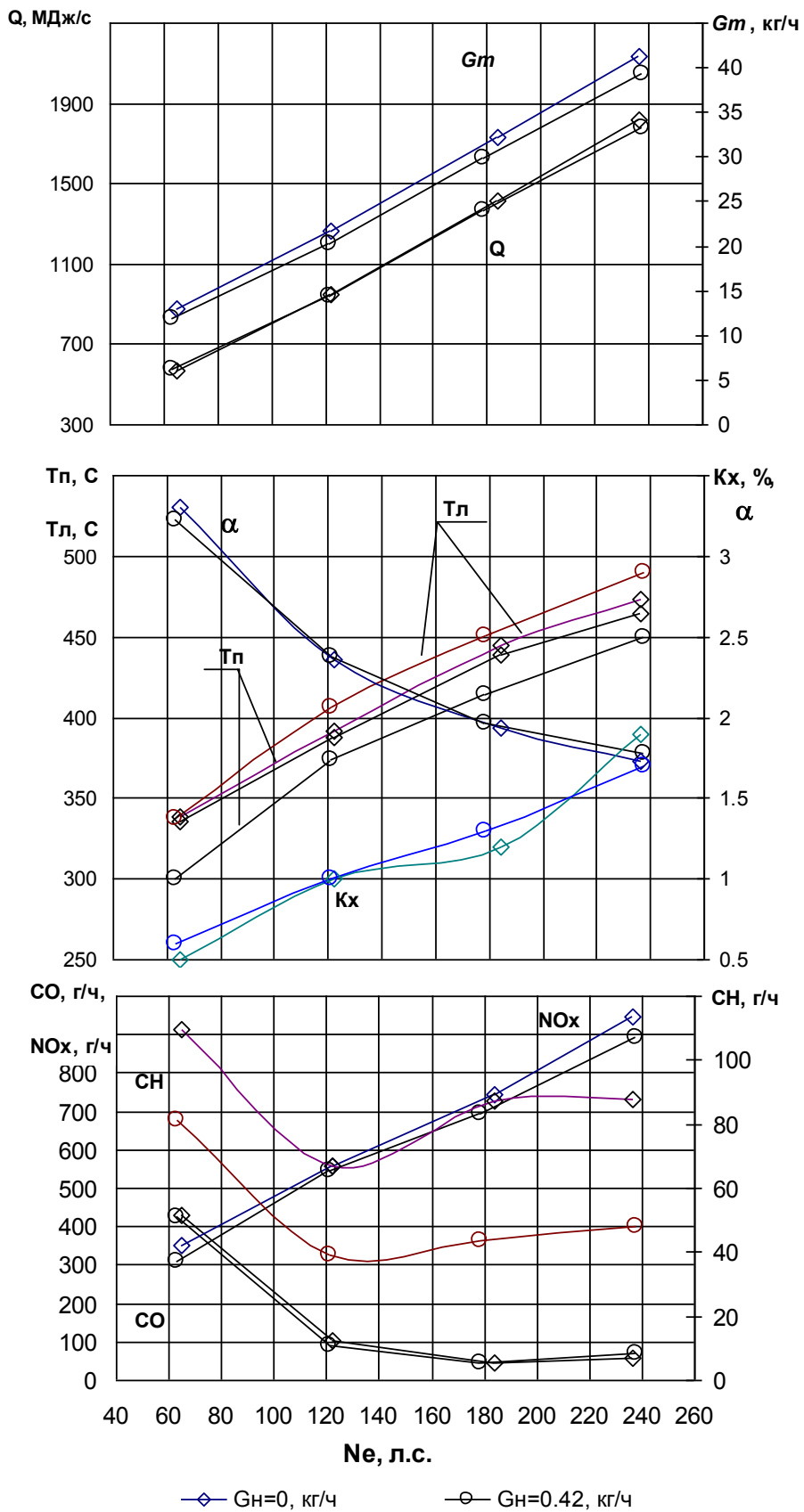


Рисунок Б3 – Нагрузочная характеристика двигателя КАМАЗ 740.62 – 280, $n = 1450 \text{ мин}^{-1}$

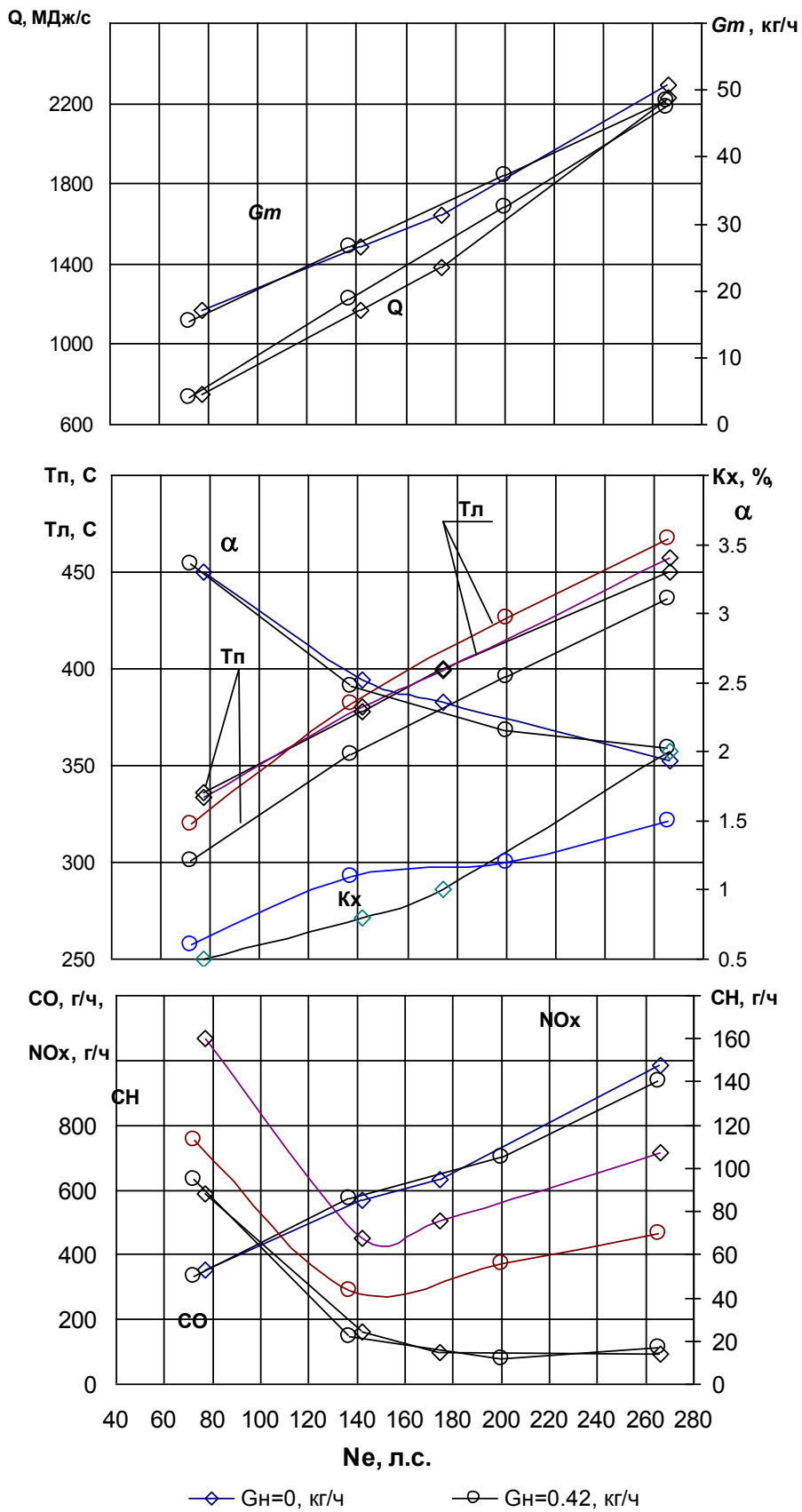


Рисунок Б4 – Нагрузочная характеристика двигателя КАМАЗ 740.62 – 280, $n = 1730 \text{ мин}^{-1}$

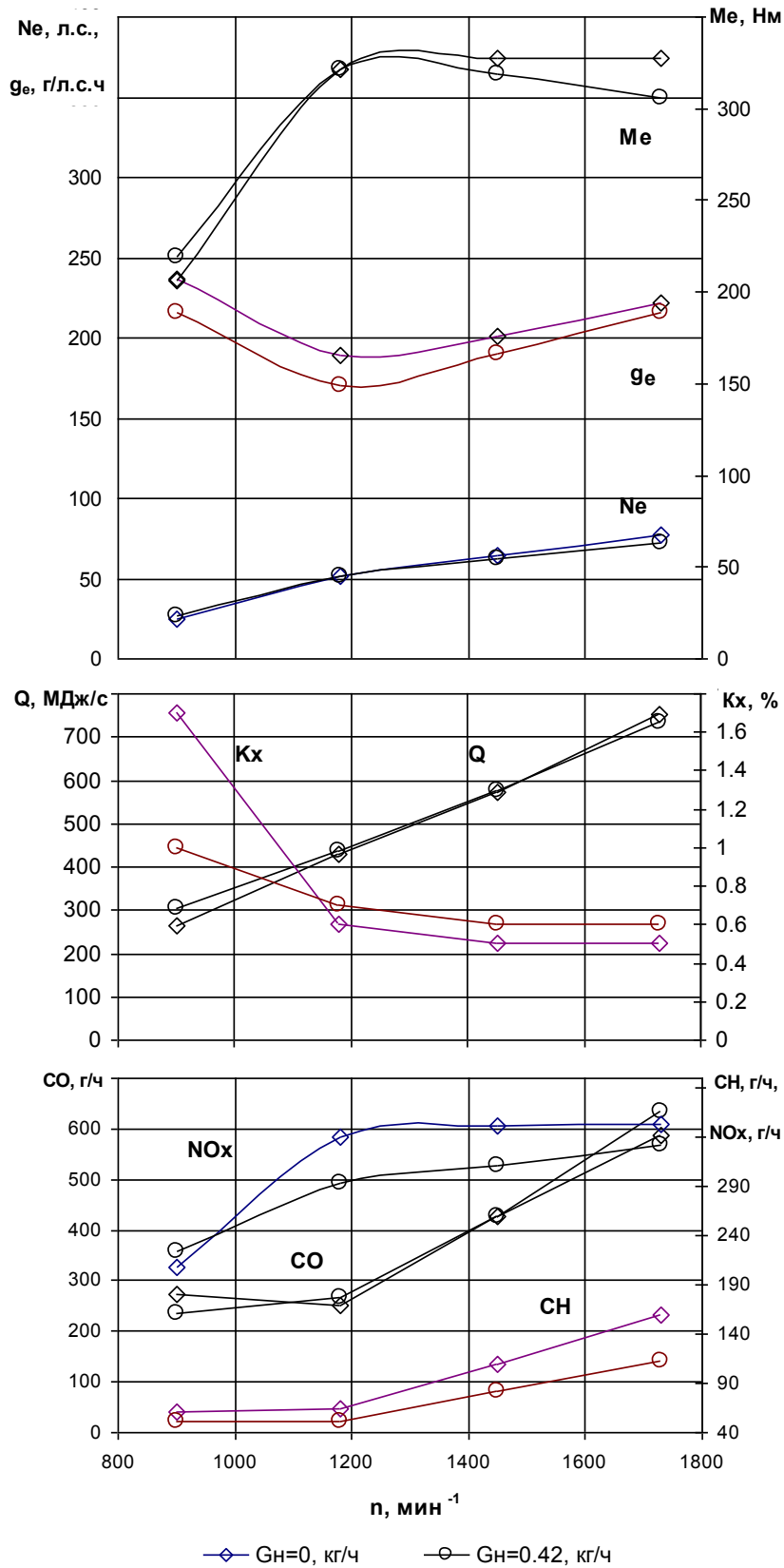


Рисунок Б5 – Частичная скоростная характеристика двигателя КАМАЗ 740.62 – 280, 25% открытия топливной рейки ТНВД

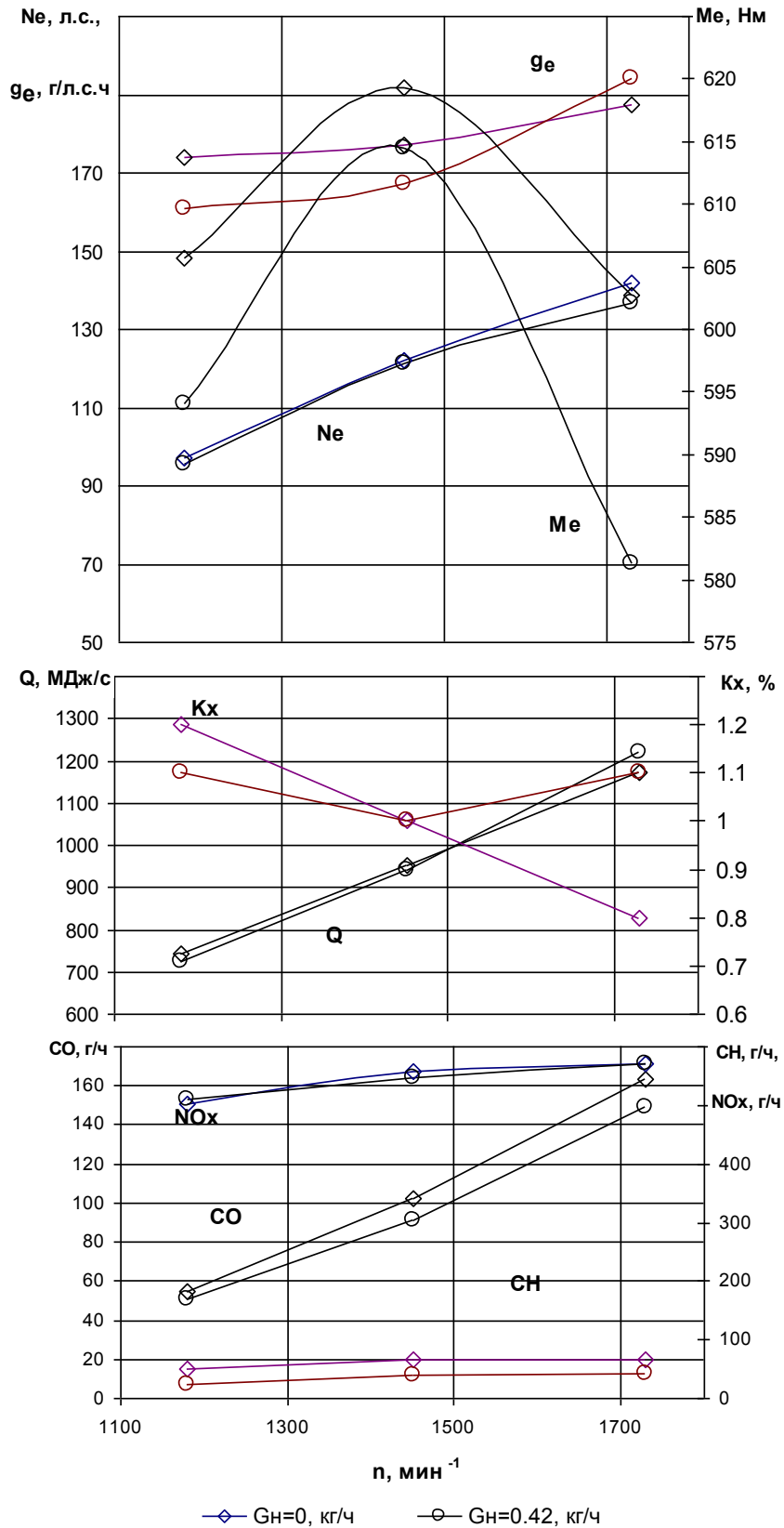


Рисунок Бб – Частичная скоростная характеристика двигателя КАМАЗ 740.62 – 280, 50% открытия топливной рейки ТНВД

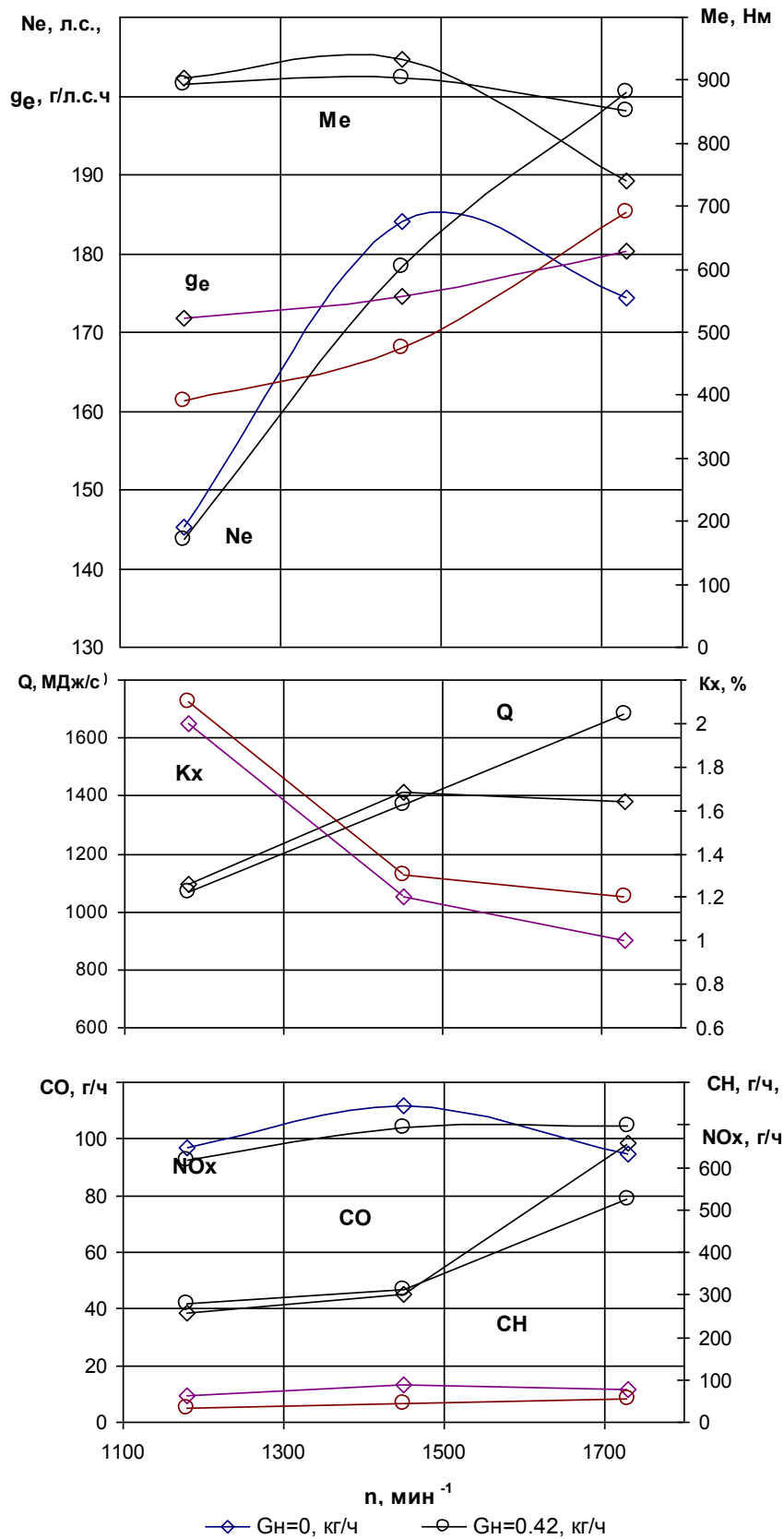


Рисунок Б7 – Частичная скоростная характеристика двигателя КАМАЗ 740.62 – 280, 75% открытия топливной рейки ТНВД

5.1. Оценка влияния добавки водорода на мощностные и экономические показатели дизельного двигателя (КАМАЗ)

На химический состав углеводородного топлива, используемого в ДВС (в нашем случае это дизельный двигатель) влияет очень много факторов. Это месторождение нефти, способ получения топлива, наличие присадок и т.д. Добавка водорода в количестве менее 1% не оказывает заметного влияния на мощностные и экономические показатели двигателя [54]. При добавлении водорода к топливу в количестве менее 1%, параметры двигателя изменяются в диапазоне принятых погрешностей (рисунки Б). Проведённые эксперименты это подтверждают. Поэтому при дальнейшем анализе экспериментальных данных из перечня можно исключить те результаты, где добавка водорода составляла менее 1% от массы топлива.

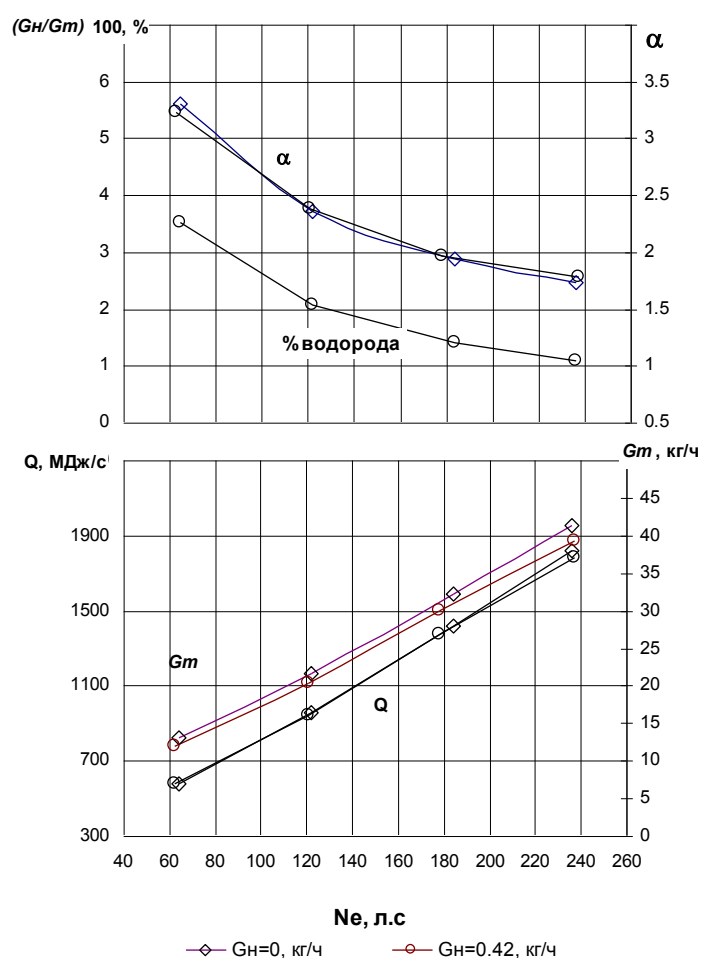


Рисунок 5.1 – Нагрузочная характеристика двигателя ($n = 1450 \text{ мин}^{-1}$)

5.2. Оценка влияния добавки водорода на мощностные показатели дизельного двигателя

Если взять за основу теплотворную способность водорода, то она будет намного больше, чем у дизельного топлива [44]. А вот плотность дизельного топлива, напротив, значительно превышает плотность водорода. И, конечно же,

все эти факторы оказывают непосредственное влияние на мощностные характеристики двигателя.

Для проведения оценки были сняты условные внешние характеристики двигателя (УВСХ) без добавки водорода и с максимально возможной подачей водорода (рисунок Б1). Это позволило оценить влияние добавки водорода на мощностные характеристики ($G_H = 0,42$ кг/ч). При частоте вращения коленчатого вала 900 мин^{-1} массовое соотношение водород-дизельное топливо на различных скоростных режимах варьировалось в промежутке 2-2,5%, при частоте 1900 мин^{-1} – менее 1% [55]. На рисунке мы видим, что мощностные характеристики двигателя не меняются при добавке водорода. Поэтому можно сделать вывод, что при добавке водорода в количестве, обеспечиваемом системой подачи водорода, мощностные характеристик не меняются.

5.3. Оценка влияния добавки водорода на экономические показатели дизельного двигателя

Экономичность двигателя количественно оценивается величиной удельного эффективного расхода топлива, а так же степенью эффективного использования теплоты, подведённой с топливом:

$$g_e = Gm/Ne.$$

где Gm – расход топлива, кг/ч;

Ne – эффективная мощность двигателя, л.с.

При добавке водорода уменьшается удельный эффективный расход топлива[33]. Данное изменение

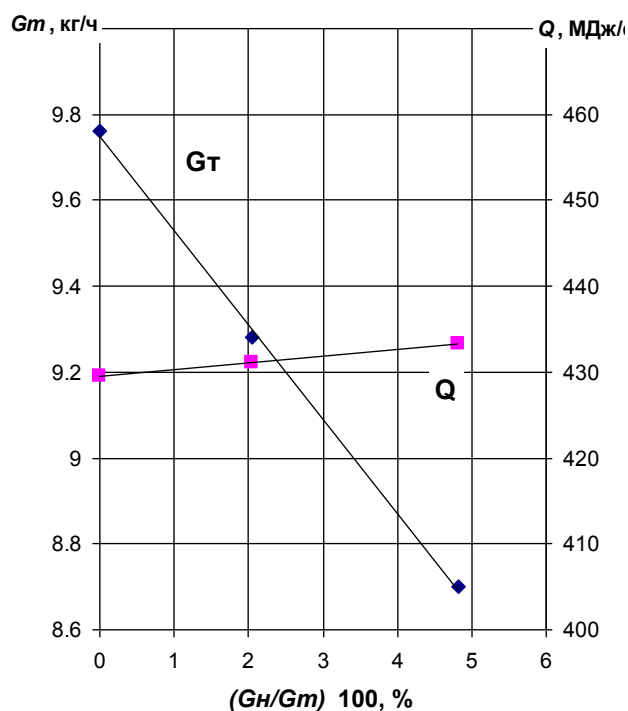


Рисунок 5.2 – Изменение $G_{т}$ и Q зависимости от процента добавки водорода: ($N_e = 42$ л.с., $n = 1180$ мин⁻¹)

g_e в зависимости от частоты вращения коленчатого вала двигателя представлено на рисунках Б. Также в случае добавки водорода изменяются теплофизические свойства топлива (рабочей смеси), поэтому мы не можем использовать данную величину в качестве критерия оценки экономичности при добавке водорода в двигатель. Параметры, по которым проводилась

дальнейшая оценка экономических показателей двигателя: Q , МДж/с – общее количество тепла, поступившее в цилиндры двигателя с дизельным топливом и водородом в единицу времени; η_e – эффективное КПД двигателя.

На рисунках Б и рисунке 5.1 представлены графики изменения количества теплоты (Q , МДж/с), подведенной к двигателю, для случаев с использованием добавки водорода и без добавки водорода. Если сравнить общее количество теплоты, подведённое к двигателю на идентичных режимах работы, то можно увидеть, что во всех случаях оно будет примерно одинаковое. При добавлении в двигатель водорода, расход дизельного топлива G_m

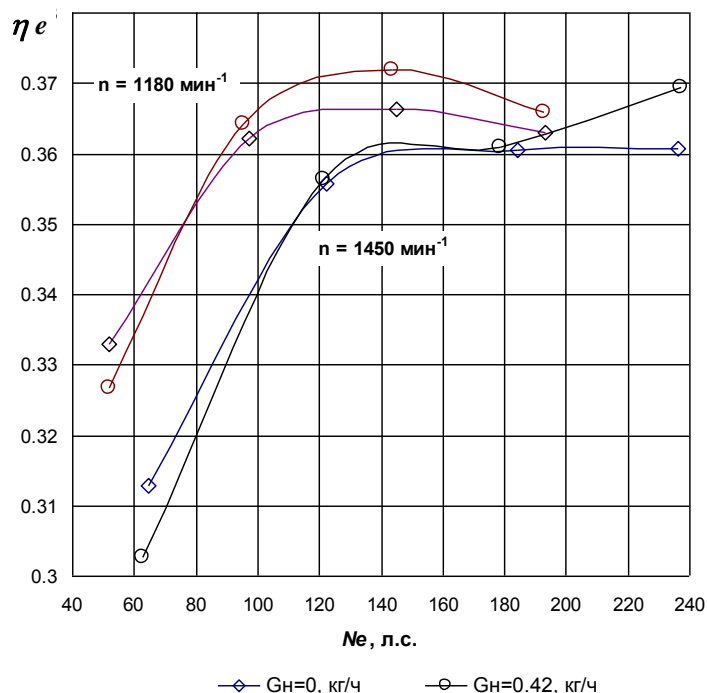


Рисунок 5.3 – Изменение эффективного КПД двигателя

уменьшается пропорционально количеству водорода. На рисунке 5.2 представлено характерное изменение расхода топлива и общего количества теплоты, подведенной к двигателю в зависимости от процента добавки водорода. Некоторый рост величины Q обусловлен погрешностью измерений.

Расход дизельного топлива по результатам измерений можно определить по формуле [25]:

$$G_m^H = G_m - G_n(Hu_H / Hu_m),$$

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

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

G_n – расход водорода, кг/ч;

Hu_H, Hu_m – низшие теплотворные способности дизельного топлива и водорода.

Расход топлива с добавкой водорода на основании представленной формулы можно оценить с погрешностью 5 %.

Анализ результатов показал, что добавка водорода не оказывает значительного влияния на КПД двигателя. На рисунке 5.3 представлены результаты, которые наглядно это подтверждают. При измерении расхода топлива были допущены неточности, поэтому при $n = 1730$ эффективное КПД двигателя существенно отличается.

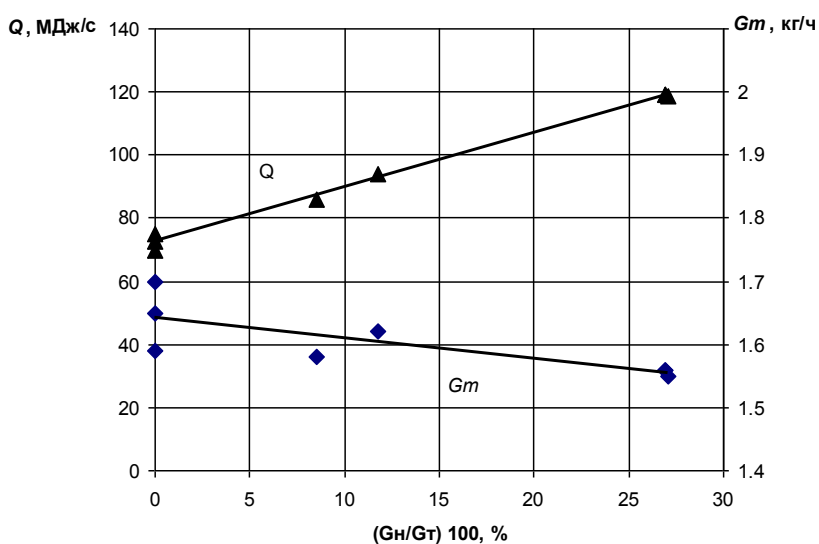


Рисунок 5.4 – Изменение Gm и Q в зависимости от процента добавки водорода на режиме XX ($n = 600 \text{ мин}^{-1}$)

На режиме XX количество подведенной теплоты к двигателю при добавке водорода заметно увеличивается (см. рисунок 5.4). Этот режим является исключением.

Вероятнее всего, это можно объяснить невозможностью дальнейшего уменьшения цикловой подачи топлива ТНВД при увеличении количества водорода.

На основании вышеизложенного делаем вывод, что добавка в принятом

диапазоне изменения расхода водорода на исследованных режимах не оказывает практически значимого влияния на эффективный КПД двигателя.

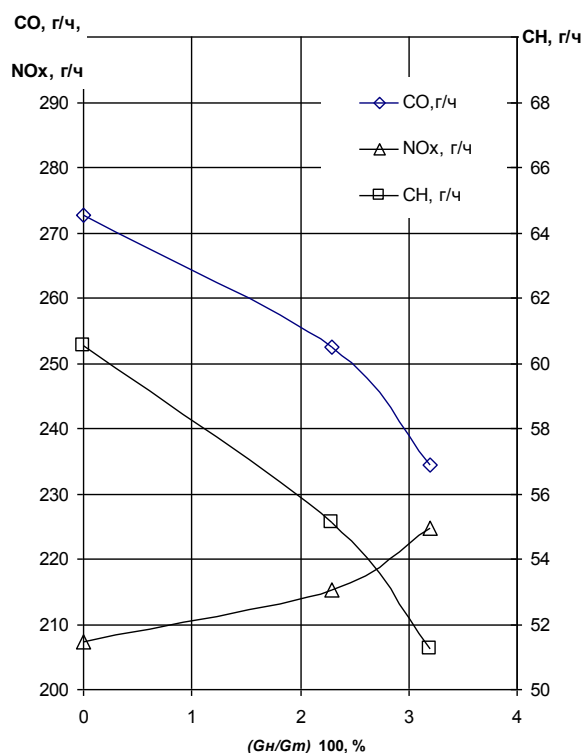


Рисунок 5.5 - Изменение выбросов CH, CO, NOx в зависимости от % добавки водорода в ТВС на режиме $n = 900 \text{ мин}^{-1}$, $N_e = 25 \text{ л.с. (D- 25)}$

5.4 Оценка влияния добавки водорода на экологические показатели дизельного двигателя

В результате того, что водород обладает высокой химической активностью, он даже в небольших количествах будет оказывать влияние на токсичность двигателя[2].

Необходимо учитывать размещение магистрали подачи водорода во впускном коллекторе двигателя, смещённой в сторону левой секции двигателя, что приводит к существенной разнице температур ОГ между левой и правой турбинами и составляет, в зависимости от режима работы, до 50 - 55 °С (см. рисунки Б). Необходимо это учитывать при анализе результатов. Разница температур не превышает 10-20 °С при работе двигателя без водорода. Из этого делаем вывод, что между правой и левой секциями двигателя водород распределяется неравномерно. На токсичность двигателя в особенности и на

другие параметры в частности такое неравномерное распределение может оказывать значительное влияние.

5.5 Продукты неполного сгорания

СН – несгоревшие углеводород, С – углерод – продукты неполного сгорания и следующие нормируемые токсичные компоненты.

Выбросы несгоревших углеводородов СН

На рисунках 5.5 и 5.6 изображено изменение выбросов СН на режиме ХХ и D - 25. Здесь мы можем наблюдать уменьшение выбросов СН. На других режимах работы двигателя мы наблюдаем такую же картину (см. рисунки Б).

Интенсивность снижения СН больше, а отношение водород-дизельное топливо выше на режимах малой нагрузки и ХХ. На рисунках Б можно увидеть характер изменения выбросов СН при добавке водорода не меняется

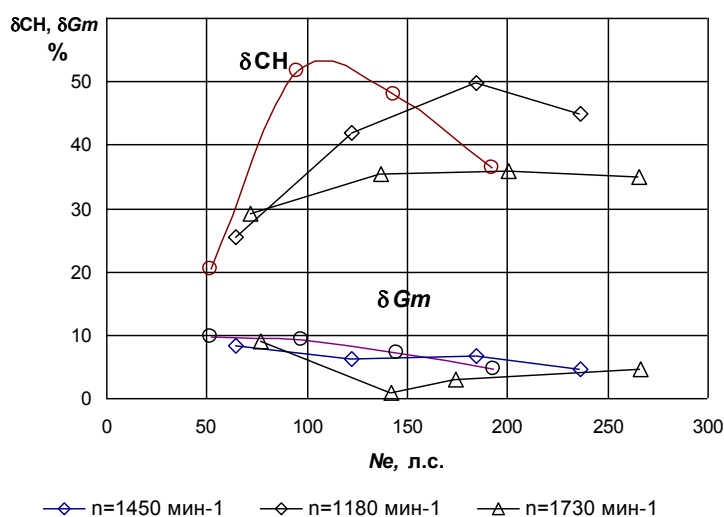


Рисунок 5.6 - Уменьшение расхода топлива δGm и снижение выбросов $\delta СН$, выраженное в относительных процентах.

– это можно увидеть, рассмотрев рисунки Б.В зависимости от режима работы и процентного соотношения водород – дизельное топливо, абсолютные значения выбросов СН при добавке водорода уменьшаются с средним на 20-50 % в массовом выражении. Следует отметить, что снижение СН не пропорционально уменьшению расхода топлива[63]. На рисунке 5.6 можно наглядно увидеть снижение выбросов СН, выраженное в относительных процентах в зависимости от нагрузки, и характерное изменение расхода топлива Gm . Эти два параметра можно определить по формулам[5]:

$$\delta Gm = 100 - (100G_m^H / Gm), \%$$

$$\delta CH = 100 - (100CH^H / CH), \%$$

где CH^H – массовые выбросы несгоревших углеводородов при использовании добавки водорода;

CH – массовые выбросы несгоревших углеводородов без использования добавки водорода.

На основании представленных выше результатов следует, что по ГОСТ Р 41-49-2003 уменьшение выбросов CH при 13-ти ступенчатом цикле испытаний двигателя составило около 40%.

5.6. Дымность ОГ и выбросы твердых частиц

Оценка дымности отработанных газов проводилась методом оптической прозрачности среды. Количество твердых частиц ОГ оценивалось методом осаждения частиц на фильтре. Все выбранные методики соответствовали ГОСТ Р 41-49-2003.

Результаты измерений выбросов твердых частиц (P_t) и дымности (K_x), полученные в ходе эксперимента, оказались неоднозначными. В частности, измерения P_t и K_x на отдельных режимах, например, А-25, и А-100, показывают, что с увеличением количества добавляемого водорода происходит увеличение как P_t , так и K_x . Однако, если рассматривать результаты по другому циклу (ESC), результаты будут прямо противоположными. Снижение выбросов частиц P_{tv} в этом случае составляет примерно 30 %.

При проведении эксперимента было зафиксировано уменьшение массы образца в процессе испытания двигателя с добавкой водорода на предмет выбросов твердых частиц. Это уменьшение было обнаружено при повторном взвешивании через 12 часов после проведения замера и в течение этого срока в результате нахождения в кондиционируемом шкафу. Около 30-50% составило снижение массы от исходной. В случае неиспользования водорода, масса образца оставалась неизменной. Это можно объяснить увеличением количества паров воды, которые образуются при добавке водорода (продукт полного сгорания водорода – пары воды). Они могут оседать на фильтре и в дальнейшем испаряться с течением времени. Но, конечно же, данный вариант развития событий требует более детального изучения. Однозначный вывод о

влиянии добавки водорода на выбросы твердых частиц и дымность ОГ сделать пока не представляется возможным (по результатам данных испытаний). Необходимо провести дополнительные более подробные исследования, включающие в себя повторные эксперименты, включающие в себя статистический анализ, а также систематизацию полученных данных. Кроме того, необходимо пересмотреть методологию измерения твердых частиц с использованием добавки водорода.

5.7.Выбросы оксида азота NO_x

Определяющим фактором для образования выбросов NO_x является увеличение температуры сгорания. Поэтому в результате добавки водорода и, как следствие, увеличения температуры, количество выбросов теоретически должно возрасти. Закономерное увеличение количества выбросов NO_x пропорционально добавке водорода мы можем наблюдать на рисунке 5.4.1 на режиме работы двигателя D-25 (примерно на 5% при добавке водорода 3%). Однако результаты, представленные на рисунках Б, на которых изображены измерения на скоростных и нагрузочных режимах работы, показывают, что на этих режимах выбросы NO_x остаются практически на исходном уровне при условии добавки водорода. Данное явление объясняется тем, что на данных режимах количество подаваемого в двигатель водорода слишком мало, чтобы оказывать какое-либо значимое влияние на температуру сгорания рабочей смеси. На идентичных режимах общее количество теплоты, подведенной к двигателю, оставалось одинаковым, и не более 3% составляет максимальное соотношение водород – дизельное топливо на указанных режимах.

Однако, на режиме ХХ этот процент возрастает до 25. Всё это можно отследить на рисунке 8, а частности изменение массовых выбросов NO_x . На рисунке мы можем увидеть некоторое снижение выбросов NO_x в процессе увеличения добавки водорода. При этом количество продуктов неполного сгорания уменьшается. Это объясняется некоторым увеличением полноты сгорания и дожигание в процессе выпуска ОГ. Данное явление можно объяснить тем, что двигатель на режиме ХХ работает на очень бедных смесях с

коэффициентом избытка воздуха более 7. Температура ОГ косвенно свидетельствует о том, что температура сгорания в этих условиях практически не меняется. В данных условиях определяющим фактором для выхода NO_x будет являться концентрация свободного кислорода в ОГ, которая снижается при использовании добавки водорода.

Следовательно, можно сделать вывод о том, что на данных исследованных режимах и в принятом диапазоне изменения расхода водорода добавка водорода не оказывает существенного влияния на выбросы NO_x . Проведённый 13-ступенчатый цикл испытаний по ГОСТ Р 41.49 – 2003 также это подтвердил. Здесь увеличение количества NO_x составило всего 3% при добавке водорода в количестве 0,42 кг/ч.

6. Анализ результатов испытаний и опыта эксплуатации системы

6.1. Анализ результатов испытаний (автобус)

Из рассмотрения результатов, представленных в таблице, можно видеть, что снижение дымности ОГ дизельного двигателя при добавке водорода в количестве 0,1 кг/час составляет порядка 50% (двух раз).

Полученная достаточно значительная количественная оценка снижения дымности требует объективного анализа, включая рассмотрение возможных погрешностей измерения и особенностей исследуемого процесса.

Рассмотрение погрешностей измерений связано с анализом систематической и случайной составляющих суммарной погрешности. Систематическая погрешность определяется, в основном, методической её составляющей и может не привлекаться к рассмотрению, как указывалось выше, при сравнительных измерениях одним и тем же прибором.

Случайная составляющая связана с действием на измеряемую величину и процесс измерения целого ряда невозможных к учёту и исключению причин. Например, неравномерности образования сажистых частиц при работе двигателя даже на одном режиме, влиянию на метод измерения простой неравномерности течения частиц и т.д. Известно, что единственным способом уменьшения случайной погрешности в таких условиях является увеличение числа опытов (повтор измерений), в связи с чем проводились многократные измерения с исключением заведомо грубых погрешностей (промахов).

Кроме того, на результаты измерений сильное влияние оказывает тепловой режим двигателя и порядок измерений. Например, при длительной работе с добавками водорода, дымность уменьшается и при отключении подачи водорода. Кроме того, дымность уменьшается и при непрерывной длительной последовательности измерений.

Для исключения подобных эффектов измерения проводились с интервалом 5 минут. Данный интервал необходим для установления исходного состояния двигателя, т.е. после работы двигателя в режиме холостого хода в течение 5 минут. Это время было определено на предыдущем этапе испытаний.

Проведённые измерения с использованием более чувствительного прибора, представленные в таблице 2, количественно повторяют первую серию испытаний и позволяют считать их достоверными. Однако, для более полного исключения факторов, приводящих к погрешности, необходимо продолжить испытания с накоплением большего количества результатов измерений, проведённых в разных условиях, что позволит сделать более достоверные выводы.

В целом результаты испытаний показывают, что разработанная система работоспособна и позволяет получить существенный эффект, выражающийся в снижении дымности ОГ при измерении по методике ГОСТ 21393-85[1], порядка двух раз.

6.2. Обсуждение опыта эксплуатации

и технологического обслуживания системы

Опыт технологической эксплуатации системы позволил определить ряд её недостатков и показал необходимость внесения некоторых изменений, а также проведения доработки системы. Это связано с объективной последовательностью внедрения опытных экземпляров новой техники: разработка, испытания, доработка, производство.

Определённую сложность при доводке системы представляли вопросы питания электролизёра и поддержания его теплового режима, особенно в зимних условиях. В частности, отмечались существенные изменения напряжения в бортовой сети автобуса, величина которого оказывает определяющее влияние на эффективность работы электролизёра. Размах этих колебаний превышает пределы эффективной его работы и составляет, по данным измерений, от 22 до 28,6 V, тогда как по ТУ диапазон должен составлять 24-28 V. Превышение напряжения выше 28 V приводит к нарушению работы электролизёра с последующим выходом его из строя.

Одним из решений данного вопроса может стать применение специального силового преобразователя-стабилизатора или, в простейшем случае, защитного устройства от повышенного (сверх 28 V) напряжения

бортовой сети. Последнее является более простым решением, однако, необходимым при практической реализации системы.

Зависимость производительности электролизёра от напряжения усложняет влияние на его рабочий процесс температуры окружающей среды. В частности, при температуре порядка нуля градусов Цельсия (в салоне автобуса) и $V=22,3$ электролизёр не может выйти на стационарный режим работы, а его производительность при этом составляет около 100 л/час.

В качестве примера на рис. 6.1 приведены графики изменения потребляемого тока, напряжения и мощности по времени, полученные при движении автобуса и температуре в салоне порядка 10^0C . Можно видеть, что сила тока увеличивается, что говорит о росте производительности, при этом напряжение несколько уменьшается.

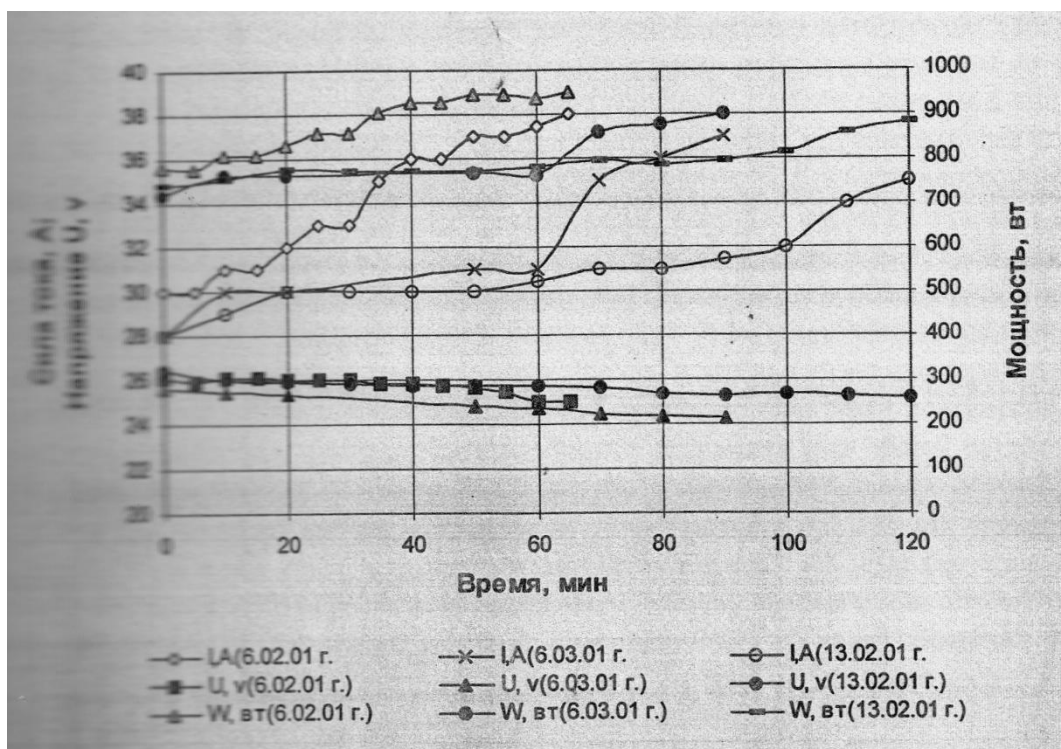


Рис. 6.1. Изменение параметров электролизёра по времени работы

В данном случае методом, способствующим уменьшению времени выхода электролизёра на режим, является обеспечение **теплоизоляции** электролизёра. Но всё же в данном случае его переход на расчётный режим работы займёт достаточно длительное время (в зависимости от напряжения до нескольких часов работы). Возможным выходом является **предварительный**

подогрев воды до температуры 90-95⁰С, что требует дополнительной технологической подготовки, усложняющей эксплуатацию системы.

Поэтому, в целом, необходимой мерой является **регулировка** и отслеживание бортового напряжения на диапазон работы 26-28 V, что соответствует технической характеристике электрооборудования автобуса при обязательном ограничении верхнего значения напряжения.

Особо следует отметить, что рабочим телом электролизёра является вода, которая при температуре ниже -4⁰С превращается в твёрдую форму (лёд), что приведёт к серьёзному нарушению целостности конструкции электролизёра. Опытным путём установлено, что при этом происходит выдавливание прокладок и разгерметизация его рабочей полости. Всё это требует последующего ремонта.

Ещё одним вопросом, требующим, пожалуй, самой серьёзной доработки является обеспечение **постоянного уровня воды в бачках** (водородном и кислородном) электролизёра. Применённое решение с регулировкой уровня по времени перелива показало, что, в связи с переменным объёмом бачков, трудно обеспечить требуемые характеристики перелива воды. Длительно отсутствие контроля в этом случае (порядка 1 часа при полной заправке бачков водой) может привести к опорожнению одного из них и, как следствие, выводу электролизёра из строя.

Безусловно, что передача функции контроля водителю автобуса не избавит от возможности опорожнения бачков, поэтому необходима доработка системы автоматизированным регулированием уровней воды, что возможно на базе внесения в конструкцию **датчиков уровня** с передачей функции контроля блоку управления при соответствующей его доработке. При этом в бачках необходимо установить перегородки для исключения значительных колебаний уровня воды, которые наблюдались при движении автобуса.

И последняя доработка системы заключается в обеспечении **аварийного её выключения** в автоматическом режиме. При этом входными сигналами должны являться минимальный уровень воды в бачках и превышение

температуры воды выше 80⁰С. В реализованной конструкции эту функцию выполнял соответствующий силовой предохранитель, который целесообразно сохранить для общей защиты цепи системы от перегрузки.

Отметим, что определённые доработки потребуются и при замене применённых на модельной системе ЭПК, в качестве которых применялись изделия авиационно-космической техники, на недорогие и надёжные образцы, выпускаемые автомобильной промышленностью. В настоящее время такие клапаны, датчики уровня, датчики давления и температуры начали выпускаться для комплектации двигателя со впрыском.

6.3. Перечень необходимых доработок системы и ориентировочная (экспертная) её цена при серийном производстве

Перечень доработок можно сформулировать следующим образом:

1. Изменение алгоритма процесса перелива воды и поддержания равных уровней в бачках электролизёра путём прямого контроля её уровня с помощью датчика уровня воды в одном или обеих бачках.
2. Внесение в функцию БУ команды о понижении уровня воды ниже допустимого с автоматическим аварийным выключением электролизёра и световой сигнализации причины.
3. Дополнение системы аварийным выключением электропитания при повышении температуры воды выше допустимых по условиям эксплуатации 80⁻⁵⁰С.
4. Ограничение верхнего уровня напряжения величиной 28V в простейшем случае с аварийным выключением системы.
5. Замена применённых в модельной системе уникальных ЭПК на изделия, выпускаемые автомобильной промышленностью.
6. Проведение работ по применению спиртоводяных систем (договор с разработчиком электролизёра) для безопасной эксплуатации в зимних условиях. Как альтернатива – возможно только сезонное применение системы.

Выполнение данных работ потребует некоторых затрат, т.к. почти все указанные функции касаются блока управления, который целесообразно полностью переработать.

Что касается стоимости системы при её серийном производстве, то экспертно её цена может составлять порядка 200-250 тыс. рублей для дизельных двигателей и, в основном, определяется стоимостью электролизёра.

6.4. Предложения по внедрению системы

1. Организовать поэтапное внедрение разработанной системы снижения токсичности и расхода топлива на муниципальном транспорте:

- автомобильный транспорт, обслуживающий зону отдыха;
- автобусы с карбюраторными двигателями;
- автобусы с дизельными двигателями.

2. Оформить заявки на патентование изобретений для систем карбюраторных и дизельных автобусных двигателей.

**7. Программа экспериментальных исследований влияния
добавок водорода на топливную экономичность
и выбросы вредных веществ
с отработавшими газами дизеля КАМАЗ.**

7.1. Основание для проведения испытаний

Договор № 1613/17/07100-07 от 01.02.07 г., заключённого между ОАО «КАМАЗ» и КГТУ им. А.Н. Туполева.

7.2. Цель проведения испытаний

7.2.1. Оценка влияния добавок водорода на показатели топливной экономичности и выбросы вредных веществ (ВВВ) с отработавшими газами (ОГ) двигателя КАМАЗ при подаче водорода в систему питания воздухом.

7.2.2. Определение количества добавок водорода, обеспечивающих достижение практически значимых результатов.

7.2.3. Определение места подвода водорода, обеспечивающего наибольший эффект.

7.2.4. Обоснование, из анализа полученных результатов, возможности применения добавок водорода с применением автономных систем, на базе современных и перспективных технологиях получения водорода.

7.3. Объект испытаний

7.3.1. Дизельный двигатель КАМАЗ.

7.3.2. Установка подачи водорода в двигатель.

7.4. Условия и методика проведения испытаний

7.4.1. Испытания двигателя проводить на испытательной станции НТЦ ОАО «КАМАЗ». Испытательный стенд должен быть укомплектован тормозной установкой, расходомером топлива и другими измерительными приборами в соответствии с требованиями ГОСТ 14846-81, ГОСТ Р 41.24-2003 (Правила ЕЭК ООН № 24-03), ГОСТ Р 41.49-2003 (Правила ЕЭК ООН № 49 (I)-04, для ESC цикла).

7.4.2. Двигатель испытывать по следующей программе:

- снятие регулировочных характеристик с определением параметров и ВВВ с ОГ двигателя на режимах 13-ти ступенчатого ESC цикла Правил №49-04 с количеством водорода 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5 кг/час. Определение количества добавок водорода, обеспечивающих достижение практически значимых результатов.

- измерение ВВВ по ESC циклу Правил №49-04, с количеством водорода определённым из регулировочных характеристик.

- измерение параметров двигателя по внешней скоростной характеристике (ВСХ), нагрузочным характеристикам (НХ) и на режимах холостого хода (ХХ) с количеством водорода определённым согласно предыдущим пунктам.

Заключение

На основе проведенных экспериментов с автобусом и двигателем автомобиля КАМАЗ, были сделаны следующие выводы:

1. Разработана, изготовлена и проведены исследования модельной системы снижения токсичности ОГ двигателя автобуса, позволившие установить требуемую расходную характеристику по водороду. В частности, получено, что добавка водорода в количестве 0,1 кг/час позволяет снизить дымность дизельного двигателя на 30-50%.
2. Так же были проведены испытания двигателя КАМАЗ в соответствии с программой испытаний, и получены результаты влияния добавки водорода на мощностные, экономические и экологические показатели двигателя: мощностные показатели двигателя не ухудшаются, на эффективный КПД двигателя водород не оказывает значимого влияния, по поводу дымности были получены неоднозначные результаты, так как на разных исследуемых режимах количество выбросов твердых частиц (Рт) то уменьшалось, то снижалось.
3. Проведён расчётный анализ выбросов вредных веществ двигателями автобусов в атмосферу города и получено, что применение данной системы в масштабе города снизит выбросы сажи на 4 тонны только при работе на ХХ (общее снижение выбросов сажи составит 20-25 тонн в год), углеводородов – на 6 тонн в год.
4. Добавка водорода в двигатель КАМАЗа привела к следующему: выбросы NOx и CO существенно не изменились, а вот выбросы СН значительно уменьшились, в некоторых случаях до 40%. В этом результаты экспериментов схожи.
5. На автобусе была разработана, изготовлена и смонтирована макетная система снижения токсичности, позволившая провести испытания в условиях опытной эксплуатации, по оценке эффективности добавок водорода. В результате испытаний получено, что:

- бортовое электрооборудование позволяет осуществить питание и функционирование электролизёра в соответствии с его технической характеристикой;
- оптимальное значение длительности подачи водорода при его расходе, равном 0,1 кг/час, составляет 0,35-0,4 с;
- снижение дымности дизельного двигателя при работе системы, измеренной по ГОСТ 21393-85, достигает 50% от исходной;

4. Определены необходимые доработки системы, выявленные при её опытной эксплуатации макетной системы на автобусе. В частности, целесообразность изменения алгоритма поддержания постоянного уровня воды в бачках электролизёра, повышению степени автономности её работы путём автоматизации ряда контрольных функций. При мелкосерийном производстве её стоимость составит 200-250 тыс. рублей.

5. Для того, чтобы результаты влияния водорода на мощностные, экономические и экологические характеристики стали более значимыми и заметными при добавке водорода в двигатель КАМАЗ, нужно увеличить количество подаваемого водорода до 1-2 кг/час на высоких скоростных режимах и режимах высокой нагрузки. Также нужно провести дополнительные исследования для более детального изучения влияния добавки водорода в ТВС на дымность ОГ и выбросы твердых частиц. Для того, чтобы неравномерность распределения водорода по составу, между правой и левой секциями двигателя, была минимальна, магистраль нужно расположить определённым способом. В области малых нагрузок и ХХ нужно предусмотреть возможность увеличения диапазона регулирования цикловой подачи дизельного топлива.

В общем и целом, хочется сказать, что добавка водорода в дизельный двигатель в любом случае приносит положительный результат в плане улучшения экологической обстановки. И нужно продолжать двигаться в этом направлении: проводить новые необходимые эксперименты, разрабатывать макетные системы и т.д. И

тогда чистое небо над головой и такое далёкое, но в тоже время близкое
счастливое будущее не заставит себя долго ждать.

Список используемых источников

1. ГОСТ 8.207-76 «Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений»
2. Жуковский А.Е. Испытание жидкостных ракетных двигателей: учеб. пособие для авиационных спец. вузов / А.Е. Жуковский, В.С. Кондрусев, В.Я. Левин, В.В. Оporочков; под ред. В.Я. Левина. – М.: Машиностроение. – 1975.
3. Новицкий П.В. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф; Л.: Энергоавтомиздат, Ленинград. отделение. – 1985.
4. Химия горения: перевод с англ. / Под ред. М.Л. Гардинера. – М.: Мир. – 1988.
5. Гамбург Д.Ю. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение: справ. Изд. / Д.Ю. Гамбург, В.П. Семенов, Н.Ф. Дубовкин, Л.Н. Смирнова. Под ред. Д.Ю. Гамбурга, Н.Ф. Дубовкина. – М.: Химия. – 1989.
6. Лютко В. Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания / В. Лютко, В.Н. Луканин, А.С. Хачиян. – М.: МАДИ, 2000 – 2 т.
7. Мищенко А.И. Применение водорода для автомобильных двигателей / А.И. Мищенко; Киев.: Наука думка, 1984.
8. Воинов А.И. Процессы сгорания в быстроходных поршневых двигателях / А.И. Воинов; М.: Машиностроение. – 1977.
9. Грушевенко, Д. Энергопотребление российского автомобильного сектора: роль технологических инноваций в межтопливной конкуренции

- [Текст] / Д. Грушевенко, Е. Грушевенко, В. Кулагин // Форсайт. – 2018. – Т. 12, № 4. – С. 35–44. – М. : НИУ ВШЭ, 2018. – . – Режим доступа :<https://foresight-journal.hse.ru/data/2019/01/25/1143385060/4-2018%20rus.pdf>, свободный. – Загл. с экрана.
10. Буранов, И. На чем ездят россияне [Электронный ресурс] / И. Буранов // Коммерсантъ. – 2018. – . – М. : ИД «Коммерсантъ», 2018. – . – Режим доступа :<https://www.kommersant.ru/doc/3752955>, свободный. – Загл. с экрана.
11. Велесюк, А. Водородная энергетика – тренд XXI века [Электронный ресурс] / А. Велесюк // Атомный эксперт. – 2018. – М. : Юг Медиа, 2018. – . – Режим доступа :http://atomicexpert.com/hydrogen_energy, свободный. – Загл. с экрана.
12. Maruta, A. Japan's ENE-FARM programme [Electronic resource] / Aki Maruta. – Vienna : Austrian Energy Agency GmbH Open Workshop “Fuel cells: Why is Austria not taking off?”, 2016. – . – Режим доступа: https://www.energyagency.at/fileadmin/dam/pdf/veranstaltungen/Brennstoffzellenworkshop_Oktober/Maruta.pdf, свободный. – Загл. с экрана.
13. Варшавский И.Л. Анализ работы поршневого двигателя на водороде/Известия вузов, Машиностроение, №10, 1977.
14. Золотницкий В.А. Новые газовые системы автомобилей. – М.: «Издательский дом Третий Рим», 2003.
15. Лютко В. Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания / В. Лютко, В.Н. Луканин, А.С. Хачиян. – М.: МАДИ, 2000 – 2 т.
16. Звонов В.А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания / В.А. Звонов. Изд. 2-е – перераб. – М.: Машиностроение. – 1981.
17. Хитрин Л.И. Физика горения и взрыва / Л.И. Хитрин; М.: - 1955.
18. Асмус Т.У. Топливная экономичность автомобилей с бензиновыми двигателями / Т.У. Асмус, К. Бргннакке и др.; под ред. Д.Хиллиарада,

- Дж.С. Спрингера; перевод с англ. Васильева; под ред. А.В. Кострова. – М.: Машиностроение, 1988.
19. Образование и разложение загрязняющих веществ в пламени; перевод с англ. Ю.Ф. Дитикина. – Машиностроение. – 1981.
20. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей. Учебник для вузов по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» [Текст] / Д.Н. Вырубов [и др.] ; под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1983. – 372 с.
21. Редзюк, А.М. Повышение топливной экономичности многоцилиндровых бензиновых двигателей в режимах малых нагрузок и холостого хода [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.04.02 / Анатолий Михайлович Редзюк ; Киевский автомобильно-дорожный институт имени 60-летия Великой Октябрьской Социалистической революции. – Киев, 1982. – 273 л.
22. Морозов, К.А. К анализу условий воспламенения при работе карбюраторного двигателя на малых нагрузках [Текст] / К.А. Морозов, Б.Я. Черняк, Е.А. Джайлаубеков // Труды МАДИ. – 1974. – вып. №71. – С. 109–117.
23. Шикунина, Н.М. Исследование экономичности карбюраторного двигателя на дроссельных режимах и экономических составах смеси [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.04.02 / Н.М. Шикунина ; Академия Наук СССР Институт двигателей. – М., 1961. – 135 л.
24. Glassman, I. Combustion [Текст] / I. Glassman, R.A. Yetter. – 4th Ed. – London : Elsevier., 2008. – 773 p.
25. Басс, Б.А. Повышение топливной экономичности бензиновых двигателей увеличением энергии источника искрового зажигания [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.04.02 / Борис Абрамович Басс ; Московский автомеханический институт. – М., 1984. – 199 л.

26. Suyabodha, A. Simulation of cyclic variability in gasoline engine under cold start conditions [Текст] : Ph. D Thesis : / ApiwatSuyabodha ; University of Bath. – Bath, 2012. – 250 p.
27. Bonatesta, F. Factors influencing the burn rate characteristics of a spark ignition engine with variable valve timing [Electronic resource] / F. Bonatesta, P.J. Shayler // IMechE. – 2008. – Part D, Vol. 222. – 2147–2158 p. – . – Режим доступа:
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.855.4762&rep=rep1&type=pdf>. – Загл. с экрана.
28. Федянов, Е.А. Межцикловая неидентичность рабочего процесса и проблемы улучшения показателей ДВС с искровым зажиганием [Текст] : дис. ... докт. техн. наук : 05.04.02 / Евгений Алексеевич Федянов ; Волгоградский государственный технический университет. – Волгоград, 1999. – 314 л.
29. The effect of combustion duration on the performance and emission characteristics of propane-fueled 4-stroke S.I. engines / A. Jehad [et al.] // Emirates Journal for Engineering Research. – 2003. – Vol. 8(1) – P. 1–14.
30. Разлейцев, Н.Ф. Моделирование и оптимизация процесса сгорания в дизелях [Текст] / Н.Ф. Разлейцев. – Харьков : Вища школа. Изд-во при Харьк. Ун-те, 1980. – 169 с.
31. Вибе, И.И. Новое о рабочем цикле двигателей. Скорость сгорания и рабочий цикл двигателя [Текст] / Иван Иванович Вибе. – Москва–Свердловск : Машгиз, 1962. – 273 с.
32. Воинов, А.Н. Сгорание в быстроходных поршневых двигателях. Изд. 2-е, перераб. и доп. [Текст] / А.Н. Воинов. – М. : Машиностроение, 1977. – 277 с.
33. Брозе, Д. Д. Сгорание в поршневых двигателях [Текст] / Д.Д. Брозе. – М. : Машиностроение, 1969. – 248 с.
34. Костычев, В.Н. Улучшение показателей двигателей с искровым зажиганием на режиме холостого хода путем снижения

- межциклового неидентичности рабочего процесса [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.04.02 / Владимир Николаевич Костычев ; Волгоградский государственный технический университет. – Волгоград, 1982. – 116 л.
35. Власов, М.Ю. Повышение эффективности рабочих процессов атмосферных и наддувных поршневых ДВС за счет улучшения межциклового стабильности [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.04.02 / Михаил Юрьевич Власов ; Тульский государственный университет. – Тула, 2012. – 16 с.
36. Ахромешин, А.В. Повышение эффективных характеристик поршневых ДВС управлением бифуркационными зависимостями межциклового неидентичности рабочих процессов [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.04.02 / Андрей Владимирович Ахромешин ; Тульский государственный университет. – Тула, 2010. – 22 с.
37. Ozdor, N. Cyclic Variability in Spark Ignition Engines – A Literature Survey [Electronic resource] / N. Ozdor, M. Dulger, E. Sher // SAE Technical Paper 940987. – 1994. – . – SAE, 2019 – . – Режим доступа : <https://www.sae.org>. – Загл. с экрана.
38. Shen, H. A Study of Cycle-to-Cycle Variations in SI Engines Using a Modified Quasi-Dimensional Model [Electronic resource] / H. Shen, P. C. Hinze, J. B. Heywood // SAE Technical Paper 961187. – 1996. – . – SAE, 2019 – . – Режим доступа : <https://www.sae.org>. – Загл. с экрана.
39. Hasse, C. Scale-resolving simulations in engine combustion process design based on a systematic approach for model development [Текст] / C. Hasse // International Journal of Engine Research. – 2016. – Vol. 17, Issue 1. – P. 44–62.
40. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение: справ. изд. [Текст] / Д.Ю. Гамбург [и др.]; под ред. Д.Ю. Гамбурга, Н.Ф. Дубовкина. – М. : Химия, 1986. – 672 с.
41. Мищенко, А.И. Применение водорода для автомобильных двигателей [Текст] / А.И. Мищенко. – Киев : Наукова думка, 1984. – 143 с.

42. Шароглазов, Б.А. Поршневые двигатели: теория, моделирование и расчет процессов: учебник по курсу «Теория рабочих процессов и моделирование процессов в ДВС [Текст] / Б.А. Шароглазов, В.В. Шишков; под ред. засл. деят. науки РФ, профессора, доктора техн. наук Б.А. Шароглазова. – Челябинск : Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – С. 36–37.
43. Концепция развития горения и взрыва как области научно–технического прогресса [Текст] / Отв. редактор академик А.Г. Мерджанов. – Черноголовка : Территория, 2001. – 171 с.
44. Смаль, Г.Ф. Альтернативные топлива для автомобилей [Текст] / Г.Ф. Смаль, Е.Е. Арсенов. – М. : Транспорт, 1979. – 151 с.
45. Хмыров, В.И. Водородный двигатель [Текст] / В.И. Хмыров, Б.Е. Лавров. – Алма–Ата : Наука, 1981. – 108 с.
46. Краткий обзор опытно–конструкторских работ по использованию в двигателях внутреннего сгорания добавок водорода к топливовоздушным смесям и практическое использование их результатов [Электронный ресурс] / В.А. Алимов [и др.] // Молодой ученый. — 2017. — №27. — С. 27–31. – Молодой ученый, 2019. – . – Режим доступа : <https://moluch.ru/archive/161/45055/>. – Загл. с экрана.
47. Мищенко, А.И. Разработка способов организации рабочих процессов ДВС с искровым зажиганием с систем для их реализации при использовании водорода в качестве топлива [Текст] : дис. ... д–ра. техн. наук : 05.04.02 / Анатолий Иванович Мищенко ; Институт проблем машиностроения АН УССР. – Харьков, 1986. – л.
48. Раменский, А.Ю. Исследование рабочих процессов автомобильного двигателя на бензино–водородных топливных композициях [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.04.02 / Александр Юрьевич Раменский ; Центральный научно–исследовательский автомобильный и автомоторный институт – НАМИ. – М., 1981. – 200 л.

49. Escher, W.J.D. The Hydrogen-Fueled Internal Combustion Engine: A Technical Survey of Contemporary US Projects (Report No. TEC74/005) [Текст] / W.J.D. Escher. – Escher Technology Associates, Inc., 1974. – р.
50. Трелин, Ю.А. Исследование особенностей работы ДВС с искровым зажиганием при добавках водорода в бензовоздушную смесь [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.04.02 / Юрий Анатольевич Трелин ; Волгоградский ордена Трудового Красного Знамени политехнический институт. – Волгоград, 1981. – 207 л.
51. Гибадуллин, В.З. Организация рабочего процесса ДВС с внешним смесеобразованием и локальной подачи микродобавок водорода в область межэлектродного зазора свечи зажигания [Текст]: автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.04.02 / Владимир Заурович Гибадуллин ; Волгоградский ордена Трудового Красного Знамени политехнический институт. – Волгоград, 1992. – 17 с.
52. Злотин, Г.Н. Если водород подать в конце такта сжатия [Текст] / Г.Н. Злотин, В.З. Гибадуллин // Автомобильная промышленность. – 1995. – №11. – С. 19–22.
53. Анализ работы поршневого двигателя на водороде [Текст] / И.Л. Варшавский [и др.] // Известия ВУЗов. – 1977. – №10. – С. 110–114.
54. Бойков, В.А. Решение проблемы внешнего смесеобразования в водородном ДВС: тез. докл. Всесоюз. научн.–техн. конф «Перспективы развития комбинированных двигателей внутреннего сгорания и двигателей новых схем и на новых топливах» [Текст] / В.А. Бойков, А.И. Мищенко, В.Д. Савицкий; под ред. и с предисл. М.Г. Круглова – М. : МВТУ, 1987. – С. 97.
55. Шатров, Е.В. Исследование мощностных, экономических и токсических характеристик двигателя, работающего на бензоводородных смесях [Текст] / Е.В. Шатров, А.Ю. Раменский, В.М. Кузнецов // Автомобильная промышленность. – 1979. – №11. – С. 3–5.

56. Аннушкин, Ю.М. Эффективность горения водородокеросинового топлива в прямоточном канале [Текст] / Ю.М. Аннушкин // Физика горения и взрыва. – 1985. – Т. 21, №3. – С. 30–32.
57. Басевич, В.Я. Промотирование горения [Текст] / В.Я. Басевич, С.М. Когарко // Физика горения и взрыва. – 1969. – Т.5, №1. – С. 99–105.
58. Галышев, Ю. В. Конвертирование рабочего процесса транспортных ДВС на природный газ и водород [Текст]: автореф. дис. ... д-ратехн. наук: 05.04.02/ Юрий Витальевич Галышев ; Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. – СПб., 2010. – 34 с.
59. Гумеров, И.Ф. Повышение экономичности двигателя за счет использования добавок водорода к бензину [Текст]: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.04.02/ ИрекФлоровичГумеров; Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое училище им. Н.Э. Баумана.– М., 1987. – 21с.
60. Лернер, М.О. Химические регуляторы горения моторных топлив [Текст] / М.О. Лернер. – М. : Химия, 1979. – С. 173–177.
61. Разветвленные цепные реакции в процессах промотирования и ингибирования горения водорода [Текст] / О.П. Коробейничев [и др.] // Физика горения и взрыва. – 2010. – Т.46, №2. – С. 26–35.
62. Ричардс (G.A. Richards). Скорость распространения пламени в факеле топлива при добавлении водорода [Текст] / Ричардс (G.A. Richards), Сойка (P.E. Sojka), Лефевр (A.H. Lefebvre) // Современное машиностроение, серия А. – 1989, №8. – С. 63–70.
63. Хрипач, Н.А. Совершенствование экологических и топливоэкономических показателей работы двигателя с принудительным зажиганием применением предварительной термохимической конверсии метанола [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.04.02 / Николай Анатольевич Хрипач ; МГТУ МАМИ. – М., 2004. – 199 л.