



## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1 АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ .....	7
1.1 Применение водорода в двигателях внутреннего сгорания .....	7
1.2 Образование нормируемых токсических веществ при сгорании топлива в поршневых ДВС.....	14
1.2.1 Выбросы окиси углерода.....	15
1.2.2 Выбросы углеводородов.....	15
1.2.2.1 Объемные углеводороды .....	15
1.2.2.2 Замороженные слои .....	17
1.2.2.3 Объемы гашения.....	19
1.2.3 Образование и выбросы окислов азота.....	21
1.2.4 Образование сажи .....	22
1.3. Нейтрализация продуктов сгорания.....	23
1.4 Двигатели с гетерогенным типом горения .....	27
2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ.....	30
2.1 Испытания дизельного двигателя КАМАЗ 740.62 – 280 с добавками водорода .....	30
2.1.1 Методика испытаний .....	30
2.1.2 Измерительное оборудование.....	32
2.1.3 Порядок проведения и объем испытаний .....	33
2.1.4 Основные расчетные зависимости, используемые при обработке результатов испытаний.....	35
2.2 Испытания дизельного двигателя ВАЗ-341 с добавками водорода .....	36
2.3 Оценка погрешностей измерений.....	39
3 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	43
3.1 Результаты испытаний дизельного ДВС с добавками водорода.....	43

3.2 Оценка влияния добавки водорода на мощностные и экономические показатели дизельного двигателя.....	44
3.2 Оценка влияния добавки водорода на экологические показатели дизельного двигателя.....	49
4 ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩЕГО ГАЗА В ДВИГАТЕЛЯХ С ГЕТЕРОГЕННЫМ СПОСОБОМ СМЕСЕОБРАЗОВАНИЯ.....	57
4.1 Получение синтез-газа из дизельного топлива.....	57
4.2 Использование синтез-газа для восстановления оксидов азота в ОГ ДВС.....	69
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	77
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....	80
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	87
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	89
ПРИЛОЖЕНИЕ В .....	91

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день в мире эксплуатируется более 700 миллионов автомобилей с двигателями внутреннего сгорания (ДВС), которые потребляют около 80% всех производимых нефтепродуктов. Дефицит нефти уже сегодня составляет около 4 миллионов баррелей в день, а к 2025 году, в связи с дальнейшим истощением запасов нефти, прогнозируется его увеличение до 20 миллионов баррелей в день. В свете этого, топливная экономичность в ДВС постепенно выдвигается на передний план, становясь одной из наиболее приоритетных задач современного двигателестроения.

Кроме этого, в свете вышесказанного, специалисты считают, что традиционные моторные топлива на основе нефти будут стремительно дорожать и к середине нынешнего века ожидается их полное вытеснение альтернативными видами топлива.

Другая причина интереса, проявляемого к альтернативным топливам – возможность значительного улучшения экологичности автомобильного транспорта, который стал основным источником загрязнения воздуха во многих крупных городах мира. В промышленно развитых странах проблема решается путем последовательного введения и ужесточения законодательных ограничений на эмиссию токсичных компонентов (СО, СН, оксидов азота - NOx) и парникового газа (CO<sub>2</sub>). В связи с этим, ведущие автомобилестроительные фирмы интенсивно проводят работы не только по усовершенствованию ДВС и систем очистки отработанных газов от токсичных веществ, но и по переводу автомобилей на экологически чистые виды альтернативных топлив.

Таким образом, ограниченные ресурсы углеводородного топлива и ужесточающиеся требования к экологичности автомобильного транспорта приводят к необходимости поиска альтернативных способов получения и

эффективного применения, в частности в поршневых двигателях внутреннего сгорания (ДВС), иных видов топлива.

Поскольку водород обладает высокой теплотворной способностью, более низкой энергией активации, чем традиционные углеводородные топлива, наиболее перспективным из альтернативных топлив считается именно водород или смеси традиционных топлив с его повышенным содержанием.

**Целью настоящей работы** является установление зависимости влияния добавок водородосодержащих газов на экологические показатели ДВС при гетерогенном способе смесеобразования.

Для достижения цели решались следующие задачи:

- изучение состояния вопроса на сегодняшний день по теме использования водородосодержащих газов в качестве топлива и добавок к традиционному моторному топливу;
- получение и обработка результатов исследования влияния добавок водородосодержащих газов экологические показатели ДВС при гетерогенном способе смесеобразования;
- установление зависимости влияния добавок водородосодержащих газов экологические показатели ДВС;
- разработка рекомендации по использованию водородосодержащих газов для улучшения экологических показателей ДВС.

**Объект исследования:** двигатели внутреннего сгорания, реализующие гетерогенный способ формирования топливо-воздушной смеси (ТВС) и работающие на дизельном топливе.

**Предмет исследования:** экологические показатели двигателя реализующий гетерогенный способ формирования топливо-воздушной смеси.

### **Научная новизна работы:**

- установление зависимости и закономерности влияния добавок водородосодержащих газов экологические показатели ДВС;

### **Практическая значимость работы:**

- разработаны рекомендации по использованию водородосодержащих газов для улучшения экологических показателей дизельных ДВС.

- результаты работы позволяет установить перспективы развития темы применения альтернативных топлив.

### **Апробация работы:**

Основные положения работы были представлены в виде доклада на студенческих научно-технических конференциях.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 3 печатных работы. Результаты работы представлены на научно-технических семинарах кафедры «Энергетические машины и системы управления» и "Студенческих Днях науки " .

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений. Объем диссертации составляет 97 страниц, включая 24 рисунка и 3 приложения.

В работе приведены результаты тематического обзора открытой литературы, работ, проводимых по теме, оценена практическая возможность различных способов применения водорода для уменьшения эмиссии токсичных компонентов и улучшению рабочего процесса ДВС.

Результаты работы позволяют сделать выводы о дальнейшем развитии предлагаемых способов улучшения экологических параметров ДВС, а также выделить наиболее перспективные направления их исследования.

# 1 АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

## 1.1 Применение водорода в двигателях внутреннего сгорания

Многие сходятся во мнении, что применение водорода в качестве топлива имеет большие перспективы. Одно из самых больших преимуществ водорода как альтернативного источника энергии является то, что это третий самый распространенный элемент на Земле и ее ресурсы практически неограниченны [1].

Водородо-воздушные смеси обладают скоростью горения, на порядок превосходящей скорость горения смесей на основе бензина или дизельного топлива. Кроме этого, смеси с водородом отличаются большей детонационной устойчивостью. При наличии минимальных добавок водорода в топливо-воздушный заряд время его сгорания значительно снижается, ввиду того, что водород, предварительно смешиваясь с зарядом поступающего в цилиндр воздуха, сгорая сам, эффективно поджигает смесь во всем объеме. Это объясняется тем, что, хотя температура воспламенения водородно-воздушной смеси и выше, чем у смесей на базе углеводородных топлив, однако благодаря более низкой энергии активации  $H_2$ , для его воспламенения требуется меньше количество энергии.

В отношении к регулировочным схемам работы двигателя это означает, что можно снизить дозу основного топлива в заряде и сделать зажигание (или же впрыск) позднее. Как следствие этого - повышение эффективности работы двигателя: инициирование горения при этом будет происходить таким образом, что пик максимально эффективного горения будет приходиться на нужную фазу рабочего такта, при этом, во-первых, резко снижаются топливные потери с выхлопными газами (чаще всего происходит практически полное сгорание), а, во-вторых, в цикле значительно уменьшается доля отрицательной работы. Помимо этого, добавка водорода

приводит к значительному (в несколько раз) снижению токсичных выбросов остаточных углеводородов и сажи, а также окисей углерода и азота.

В подтверждение утверждения о перспективности водорода можно констатировать тот факт, что многие передовые экономически развитые страны, такие как США, Германия, Япония, проводят активные технические разработки в области водородных технологий. Следует также отметить, что Департамент Энергетики США (DOE) в январе 2006 года принял план развития водородной энергетики «Roadmap on Manufacturing R&D for the Hydrogen Economy»

8 августа 2005 года Сенат США принял Energy Policy Act of 2005. Законом предусмотрено выделение более \$3 млрд на различные водородные проекты и \$1,25 млрд на строительство новых атомных реакторов, производящих электроэнергию и водород. [2,3]

Автомобильный транспорт в настоящее время является основным потребителем углеводородного топлива. При этом если рассматривать среднестатистическую оценку численности автомобилей для развитых стран около 500 автомобилей на тысячу человек, в России – около 270, то возрастание парка в нашей стране с каждым годом естественно вызывает увеличение потребности в топливе [4]. Однако по некоторым прогнозам запасы органических топлив будут израсходованы в ближайшие десятилетия, поэтому отдаление данного момента путем экономии и рационального использования, в т.ч. за счет перехода на альтернативные топлива, становится задачей поддержания национальной безопасности государства. К настоящему времени, наряду с другими недостатками, использование водорода на транспорте сдерживается отсутствием инфраструктуры его заправки. Однако за последнее десятилетие в мире уже построено семь заправок водородом автомобилей и их численность будет расти. Так, в 2003 году Shell и General Motors инвестировали один миллиард долларов в



разработку автомобилей на водороде. По словам руководителя «водородного» направления компании Shell Джереми Бентама: «Открытие этой станции означает новую стадию развития «водородной экономики». К 2050 г. водород будет играть большую роль в производстве энергии». [5]

При этом мировые производители уже всерьез рассматривают выход на рынок автомобилей использующих водород в качестве топлива, например, компании FORD, BMW, MAZDA и т.д. выпустили ДВС на водороде, компании Mercedes, GM и др. работают над созданием автомобилей на топливных элементах [6].

Тем не менее, по оценкам Дж. Ромма, бывшего помощника министра энергетики США, водородные автомобили (на основе ДВС или ТЭ) достигнут приемлемой цены, стоимости затрат на эксплуатацию и безопасности не ранее 2030 года. А затраты на создание самой «водородной инфраструктуры» (подразумевается сеть заправочных станций и центров обслуживания) в масштабах США оцениваются Аргоннской национальной лабораторией в \$600 млрд. Соглашаясь с подобными оценками, BMW и Mazda предлагают сохранить в автомобиле с ДВС возможность использовать как водород, так и традиционное топливо – бензин. Двухтопливный подход обеспечит постепенный переход автотранспорта на водород по мере развития необходимой инфраструктуры.

Что касается России, переход на использование водородного топлива должен осуществляться постепенно, что объясняется, в первую очередь, отсутствием распространенной технологии производства и заправки водородом, развитие которой требует огромных капиталовложений, недостаточной степенью проработанности в научном плане всех вопросов его применения в качестве топлива. В связи с этим в первую очередь следует рассматривать применение водорода как добавки к основному традиционному углеводородному топливу. Для исследования данного

направления было предпринято множество работ как в нашей стране, так и за рубежом. В 70 - 80-е годы прошлого века большие исследования были проведены в Советском Союзе автомобильными институтами городов Москва, Киева и Ленинграда. [7] Однако данные исследования в основном были направлены на изучение возможности использования водорода в качестве добавки к бензину, а как добавка к природному газу нигде не рассматривался. Тем временем, современные требования по экологичности автомобиля определяют более серьезные и глубокие исследования процесса сгорания. Работы того периода были связаны с использованием больших запасов водорода на борту транспортного средства, что в ракурсе сегодняшнего дня является неподходящим вариантом технологии для массового применения. К тому же, жесткие требования по выбросам токсичных основных компонентов в отработавших газах требуют серьезного изучения работы двигателя на частичных режимах, что мало отражено в проведенных исследованиях.

Использование чистого водорода в качестве топлива в ДВС не позволяет достичь выпуска автомобиля с нулевой токсичностью, поскольку в отработавших газах содержатся все токсичные составляющие ОГ, но в значительно меньших количествах, что экспериментально доказано учеными Германии, США, России. Кроме этого, изучение работы двигателя при использовании чистого водорода показало низкую эффективность его использования в направлении повышения экологичности при работе на частичных нагрузках. При городском цикле движение автомобиля определяет работу двигателя на частичных нагрузках. При этом доля, приходящаяся на неблагоприятные с точки зрения экономичности и токсичности, режимы работы двигателя составляет значительную величину (около 80%). Экспериментально определено, что эффект воздействия водорода на сгорание смеси в цилиндре двигателя более значим при низком

уровне турбулентности заряда в присутствии большого количества остаточных газов, что характерно для данных режимов работы ДВС. Исследование этих особенностей, а также установление баланса в цепочке преобразования энергии топлива в полезную механическую работу при использовании дополнительного звена (устройство конверсии углеводородного топлива в водородосодержащий газ) с одной стороны и выполнение перспективных норм по токсичности, с другой является важной задачей, решение которой позволит определить пути развития двигателестроения. Установление зависимостей каждой составляющей цепочки преобразования энергии позволит оценить перспективность выбранного направления совершенствования ДВС. Разработка, на основе результатов предполагаемой работы, расчётной методики оценки потребного количества водорода (соотношения водород-углеводородное топливо) при фиксированных показателях ДВС позволит резко снизить затраты на экспериментальную отработку двигателей и привлечёт интерес конструкторов к данному направлению. Отметим, что в настоящее время применение водорода связано исключительно с экспериментальной доводкой, что не позволяет разработчикам на ранней стадии проектирования расчётным путём определить возможный эффект данного технического решения, и, естественно, этим затрудняет практическое применение.

Кафедрой «Энергетические машины и системы управления» ТГУ проводятся исследования влияния добавок водорода в топливо-воздушную смесь на показатели ДВС (с искровым зажиганием и дизели) более 10 лет. За этот период был накоплен значительный опыт, касающийся как проведения таких работ, так и большое количество экспериментальных данных требующих детального анализа. В ходе работ акцент делался на использование малых добавок водорода и водородосодержащего газа. Это объяснялось следующими причинами:

- в настоящее время отсутствует технология получения больших количеств водорода по приемлемой цене;

- результаты проведенных различными авторами исследований работы ДВС на чистом водороде, а также физико-химические его свойства как моторного топлива однозначно подтверждают, что для сохранения мощностных показателей необходима специальная конструкторская доработка двигателя, суть которой сводится к повышению рабочего объема двигателя или к применению наддува, что ухудшает массовые показатели и усложняет конструкцию;

- известные результаты исследований однозначно показывали, что при малых добавках водорода происходит наиболее значительное изменение, причём в сторону улучшения экономических и экологических показателей.

Проводимые исследования дали возможность подробно изучить воздействие небольших добавок водорода, количественно определить их величиной порядка 4-6 % от расхода топлива (бензина), что соответствует выводам практически всех авторов аналогичных работ и физически объяснить причину этого факта. Наибольшее внимание при исследованиях уделялось определению наиболее важных для организации эффективного рабочего процесса ДВС величин: нижнего предела устойчивого горения, мощностных составов бензоводородовоздушной смеси. Доказано, что с повышением относительного количества водорода в смеси увеличивается диапазон возможных режимов работы ДВС, как диапазон между экономическим и мощностным значением коэффициента избытка воздуха. Проведённые стендовые исследования действия малых добавок водорода и полученный при этом опыт позволили определить целесообразность и впервые разработать автономную систему подачи водорода, основанную на применении электролизёра (или гидридного накопителя), модификации которой проходили испытания на автомобилях ВАЗ-1111 «Ока», ВАЗ-2105,

автомобилях с впрыском топлива ВАЗ-210932 и ВАЗ-21102. Результаты показали возможность повышения КПД двигателя при работе по Европейскому ездовому циклу на 25% при снижении эмиссии  $\text{CO}_2$  в два раза и возможность снижения эмиссии  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$  и  $\text{CH}$  до уровня норм Евро-5 без нейтрализации отработавших газов [8]. На разработанный способ совершенствования процесса сгорания топлива и на систему подачи водорода был получен патент № 2167317 «Способ совершенствования процесса сгорания топлива в двигателе внутреннего сгорания и система для его осуществления». В результате проведенных работ было показано, что на автомобилях с электронной системой управления двигателем при добавках водорода не превышающих 100 л/ч, что обеспечивают современные технологии получения водорода, возможно значительное улучшение токсических показателей при сохранении экономических. В частности, автомобилем ВАЗ-21102, укомплектованным по нормам Евро-2 при установке разработанной системы добавок водорода были практически выполнены нормы Евро-3 при сохранении выбросов двуокси углерода  $\text{CO}_2$ , т.е. расхода топлива. Необходимо отметить, что система обладает резервами, позволяющими обосновать возможность дальнейшего снижения уровня нормированных вредных выбросов. В Институте катализа СО РАН им. Борескова разработан генератор водородосодержащего газа, позволяющий получать на борту автомобиля из бензина или природного газа в необходимых количествах смесь газов, состоящую в среднем из 40-45% водорода, 50% оксида углерода (так же горючего компонента) и в остатке - ряд различных веществ ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ). Это позволило в 2001 и 2004 гг. подготовить моторный бокс и провести в ТГУ совместные оценочные стендовые испытания работы двигателя на вырабатываемом газе. Полученные результаты имеют предварительный характер и показывают, что в объеме проведенных испытаний отмечается значительное снижение

токсичности при повышении на ряде режимов и экономичности. Кроме того, на основе полученного опыта были уточнены и согласованы требования к автомобильному варианту генератора водородосодержащего газа, а так же сложились основы научного сотрудничества между участниками работы. Дальнейшее продолжение работ с участием Институтом катализа СО РАН позволит создать усовершенствованный образец генератора водородосодержащего газа и провести более полные исследования рабочего процесса ДВС. Отметим, что данное направление активно разрабатывается и за рубежом.

Воздействие на рабочий процесс считается наиболее перспективным направлением по снижению токсичности ОГ, т.к. воздействие оказывается непосредственно на причины образования токсичных веществ.

Таким образом, как с энергетической, так и с экологической точки зрения, по многочисленным данным водород считается наиболее перспективным топливом. Это подтверждают и многочисленные исследования, ведущиеся сегодня во всем мире, по развитию водородных технологий. Однако, использование чистого водорода в качестве топлива связано со значительными проблемами, основной из которых является хранение водорода на борту автомобиля в необходимом количестве.

Решением указанной проблемы может быть использование водорода в качестве добавки к основному углеводородному топливу.

## **1.2 Образование нормируемых токсических веществ при сгорании топлива в поршневых ДВС**

При сгорании углеводородного топлива в цилиндре ДВС образуется большое количество различных химических веществ, отличающихся по степени воздействия на окружающую природу. Из общего их количества в

настоящее время по степени этого воздействия выделены и нормируются: окись углерода  $CO$ , углеводороды различного строения и состава  $CH$ , окислы азота  $NO_x$ , и сажа.

### **1.2.1 Выбросы окиси углерода**

Так как окись углерода  $CO$  является продуктом неполного сгорания, то основным фактором, количественно определяющим образование и выбросы  $CO$  является коэффициент избытка воздуха.

Для уменьшения выбросов  $CO$  необходимо обеспечить коэффициент избытка воздуха несколько выше стехиометрического состава. При составах смеси  $\alpha < 1$  имеет место неполнота химической реакции вследствие чего наблюдаются значительные выбросы  $CO$  [14, 18].

### **1.2.2 Выбросы углеводородов**

Анализ причин образования  $CH$  позволяет выделить несколько наиболее значимых источников образования несгоревших  $CH$  в цилиндре двигателя [30]:

- объемные углеводороды;
- замороженные слои;
- объемы гашения.

#### **1.2.2.1 Объемные углеводороды**

Основным фактором, влияющим на образование объемных  $CH$ , является состав смеси, который определяется коэффициентом избытка воздуха  $\alpha$  [14, 30]. На рисунке 1.1 представлена характерная зависимость изменения концентрации токсичных компонентов в ОГ современных бензиновых двигателях внутреннего сгорания от  $\alpha$ . Из рисунка 1 видно, что минимум  $CH$  соответствует значению  $\alpha \approx 1,1-1,2$ .

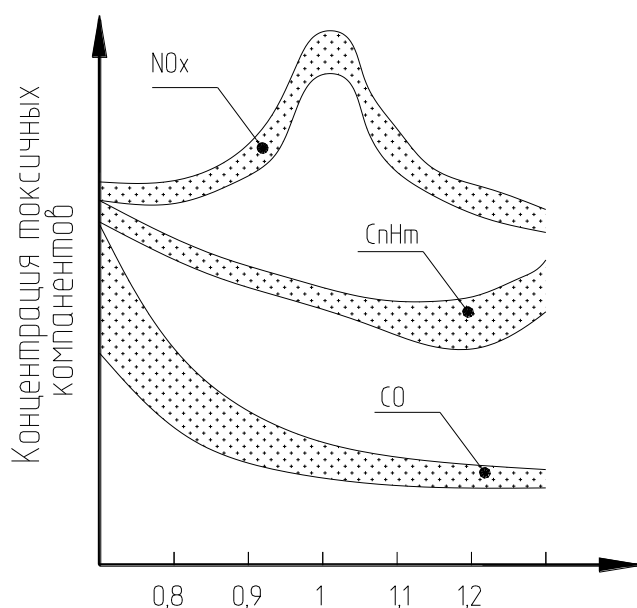


Рисунок 1.1 - Изменения концентрации токсичных компонентов от состава смеси

При  $\alpha < 1$  значительное количество  $CH$  в ОГ является следствием неполноты сгорания топлива из-за отсутствия необходимого количества окислителя в ТВС [16]. Полноту протекания процесса сгорания можно оценить коэффициентом молекулярного изменения горючей смеси  $\mu$  [31] и записать в виде:

$$\mu = M_2 / M_1, \quad (1.1)$$

где  $M_1$  – количество горючей смеси,

$M_2$  – количество продуктов полного сгорания

Для иллюстрации, характерное изменение коэффициента молекулярного изменения в зависимости от состава смеси, для случая использования бензина в качестве топлива, представлено на рисунке 1.2 [31].



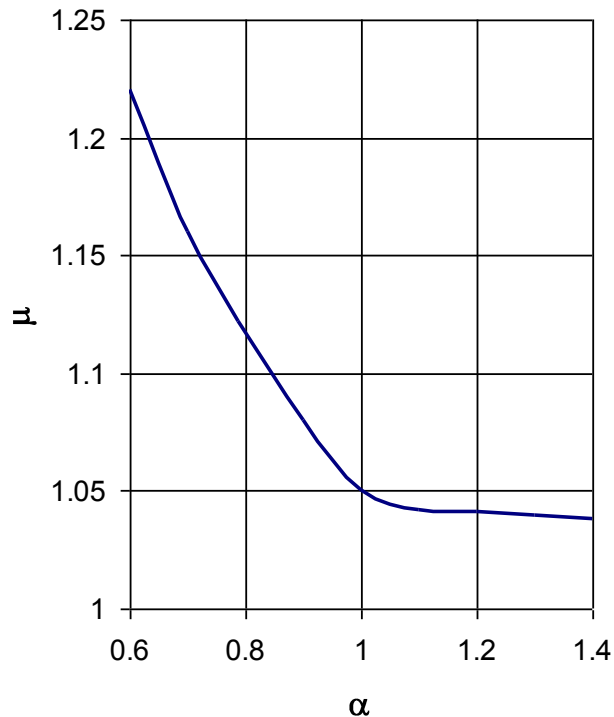


Рисунок 1.2 - Зависимость химического коэффициента молекулярного изменения от коэффициента избытка воздуха

Аналогичная картина имеет место для коэффициента молекулярного изменения метана.

Повышение  $CH$  при  $\alpha > 1.2$  обусловлено ухудшением сгорания топлива вследствие приближения к границе стабильного горения (бедный срыв пламени) [16].

Таким образом, для минимизации выбросов объемных  $CH$  необходимо обеспечить стабильную работу ДВС (в том числе и на режимах пуска и прогрева) при  $\alpha \cong 1$  и несколько выше.

#### 1.2.2.2 Замороженные слои

Существование замороженных слоев у стенки цилиндра ДВС впервые продемонстрировано с помощью фотографий, показывающих уменьшение

свечения пламени вблизи этой стенки [16, 30] (см. рисунок 1.3). Фотографирование процесса сгорания позволило определить толщину зоны, в которой происходит гашение пламени в пределах 0,15 - 0,38 мм [14, 16]. Опытным путем было показано, что основными факторами, влияющими на толщину этой зоны гашения, замороженного слоя, оказывают влияние температура и давление в момент замораживания. По данным при температуре стенки цилиндра  $T_{ст} > 100^{\circ}\text{C}$  количество  $\text{CH}_4$ , приходящееся на замороженные слои, составляет не более 5-7 % [30]. Однако, с понижением температуры доля  $\text{CH}_4$ , приходящаяся на замороженные слои значительно увеличивается, например, понижение средней температуры стенки цилиндра с 190 C до 70 вдвое увеличивает концентрацию  $\text{CH}_4$  в ОГ.

Эмпирически зависимость толщины замороженного слоя от температуры и давления по данным можно представить в виде:

$$q \approx q_r \left( P_r / P \right)^{\psi} \left( T_r / T \right)^{\gamma}, \quad (1.2)$$

где  $q$  – толщина замороженного слоя;

$P$  и  $T$  - давление и температура;

$\psi$  и  $\gamma$  - эмпирические коэффициенты;

индекс  $r$  обозначает граничные условия.

Недостатком формулы (1.2) является то, что для ее применения необходимо знать коэффициенты  $\psi$  и  $\gamma$ , определение которых является сложной экспериментальной задачей. Частично исключить недостатки формулы (1.2) позволяет формула (1.3) [17]:

$$d_{кр}^2 = \frac{F \cdot A \cdot \beta \cdot \chi \cdot X_f}{c_p \cdot re \cdot \omega}, \quad (1.3)$$

где  $d_{кр}$  - критическое расстояние от фронта пламени до поверхности, при котором происходит гашение пламени (толщина замороженного слоя);

$re$  - реакционная зона;

$A$  - число Авагадро;

$\beta$  - безразмерный коэффициент, величина которого зависит только от геометрической формы гасящей поверхности;

$\chi$  - коэффициент теплопроводности;

$\omega$  - скорость реакции;

$F$  - постоянная, определяющая отношение скорости реакции во время прохождения пламени к скорости реакции, которая необходима в зоне реакции для того, чтобы произошло распространение пламени;

$X_f$  - мольная доля топлива;

$c_p$  - теплоемкость при постоянном давлении.

Однако и она в полной мере не позволяет производить расчеты вследствие невозможности точного определения входящих величин.

### 1.2.2.3 Объемы гашения

Источниками несгоревших  $CH$  являются щели, размеры которых слишком малы для распространения пламени [16, 32].

Исследования показывают, что основная масса  $CH$ , образующихся в объемах гашения приходится на область 1-го поршневого кольца (см. рисунок 3).

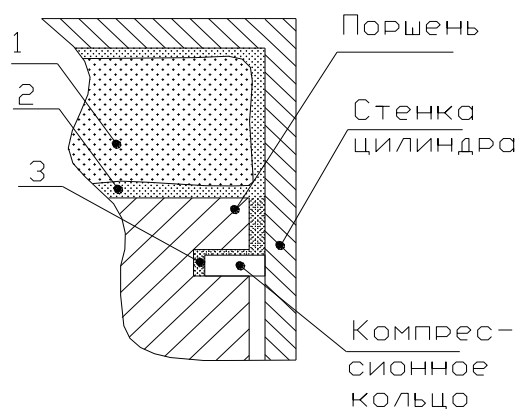
Количество образующихся в объемах гашения  $CH$  можно выразить эмпирической зависимостью [16]:

$$m_{CH} = VFS(P, T) / (1 + F) \quad (1.4)$$

где  $V$  - объем зазора, в котором происходит гашение пламени;

$F$  - отношение, воздух/топливо;

$S$  - плотность.



- 1- источник объемных  $СН$   
 2- замороженные слои  
 3- объемы гашения

Рисунок 1.3 – Источники несгоревших углеводородов

При этом минимальный размер зазора, в котором происходит гашение пламени согласно можно определить по формуле:

$$d_{кр} = \frac{12 \cdot T_F^2}{298^2 \cdot N_f} \cdot \frac{i_{mol}}{k_{cp}} \cdot \left( \frac{1}{\frac{P_H}{D_H} + \frac{P_O}{D_O} + \frac{P_{OH}}{D_{OH}}} \right)^{1/2}, \quad (1.5)$$

где  $T_F$  - равновесная адиабатная температура пламени;

$N_f$  - число молекул топлива в единице объема;

$k_{cp}$  - средняя константа скорости реакции активных частиц с молекулами топлива;

$i_{mol}$  - часть молекул, присутствующих в газовой фазе, которые должны реагировать для того, чтобы пламя распространялось;

$P$  - парциальные давления соответственно  $H$ ,  $O$  и  $OH$ ;

$D$  - коэффициенты диффузии соответственно  $H$ ,  $O$  и  $OH$ .

Из формул (1.4) и (1.5) видно, что  $m_{CH}$  зависит от плотности, температуры и концентрации активных центров.

Необходимо отметить, что на выбросы  $CH$  влияют и такие факторы, как шероховатость и нагар в камере сгорания, образующийся при эксплуатации ДВС. Повышение шероховатости поверхностей головки цилиндра и днища поршня, являющихся результатом их механической обработки или нарастания отложений на этих поверхностях, увеличивают выбросы  $CH$  [30].

Таким образом, суммарное количество  $CH$  на выходе из цилиндра двигателя можно представить как:

$$CH_{\Sigma} = CH_{\alpha} + CH_{з.с.} + CH_{о.г.}, \quad (1.6)$$

где  $CH_{\Sigma}$  - суммарное количество несгоревших углеводородов на выходе из цилиндра;

$CH_{\alpha}$  - количество углеводородов образованных вследствие неполноты реакции сгорания;

$CH_{з.с.}$  - количество углеводородов приходящихся на замороженные слои;

$CH_{о.г.}$  - количество углеводородов приходящихся на объемы гашения.

В зависимости от условий и режима работы ДВС количественные значения отдельных членов левой части выражения (1.6) изменяются в широких пределах и, следовательно, определяют суммарное количество выбрасываемых  $CH$ .

### 1.2.3 Образование и выбросы окислов азота

Оксиды азота, в отличие от рассмотренных выше веществ, образуются при горении в воздушной среде любого топлива- даже водорода, поскольку азот, присутствующий в составе воздуха, при горении в присутствии кислорода в качестве окислителя и высоком давлении реагирует с кислородом, образуя окись азота  $NO$  и небольшое количество двуокиси  $NO_2$ .

Окисление азота происходит при температуре выше 1500 К и скорость процесса тем выше, чем выше температура.

В соответствии с общеизвестной теорией Я.Б. Зельдовича, скорость образования оксидов азота определяется максимальной температурой в зоне реакций, концентрацией азота и кислорода в продуктах сгорания и не зависит от химических свойств топлива, состояния и материала стенок камеры сгорания [33].

Образование  $NO_x$  происходит при быстро изменяющихся температуре и давлении. При температуре газов выше 2500 К время релаксации окиси азота менее  $5 \cdot 10^{-3}$  с, что намного меньше продолжительности цикла по времени. Поэтому в реакциях окисления газы находятся в термодинамическом равновесии. При резком уменьшении температуры газов в процессе расширения время релаксации возрастает до  $10^{-1}$  с и превышает длительность цикла. В результате этого термодинамическое равновесие нарушается и происходит «закалка» или замораживание газов, следствием чего является сохранение уровня равновесной концентрации, характерной для высоких температур.

Таким образом, образование и уровень содержания в ОГ окислов азота полностью определяется температурой и давлением сгорания топливной смеси. Поэтому все мероприятия по снижению выбросов  $NO_x$  имеют направленность на снижение температуры в цилиндре двигателя.

#### **1.2.4 Образование сажи**

При сгорании углеводородных топлив в различных горелках и двигателях внутреннего сгорания в отработавших газах может содержаться твердый углеродный продукт в дисперсном состоянии (сажа). Другие твердые углеродистые соединения (пироуглерод и нитевидный углерод)

обычно в отработавших газах не содержатся, так как образование их происходит на твердых поверхностях [43].

Образование сажи представляет собой объемный процесс термического разложения (пиролиза) углеводородов в газовой (паровой) фазе в условиях сильного недостатка (отсутствия) окислителя(кислорода).

Выделение сажи в процессе сгорания может быть разделено на три основные фазы:

- образование зародыша;
- рост зародышей в частицы сажи;
- коагуляция первичных сажевых частиц.

В дизеле можно наблюдать явление, когда при большой нагрузке топливо, содержащее ароматические углеводороды, меньше образует дыма, чем топливо, имеющее в своем составе парафины. Это происходит из-за более длительного периода индукции в случае сгорания топлива с ароматическими углеводородами, вследствие чего смесь в камере сгорания имеет больше возможностей стать гомогенной до начала горения [42].

Образование сажи в дизелях может происходить так же при попадании струй топлива на сравнительно холодные стенки цилиндра [44].

### **1.3. Нейтрализация продуктов сгорания**

Снижения токсичности продуктов сгорания тепловых двигателей можно достичь установкой в выпускной системе дополнительных технических средств, использующих механическую, физико-химическую, электрическую и электромагнитную энергию. К ним относятся сажевые и инерционные фильтры, циклоны, нейтрализаторы (термические, каталитические, восстановительные и жидкостные), плазмохимические реакторы, дожигатели различных типов, электрофильтры, сверхвысокочастотные установки, электрофильтры-дожигатели и др. Принципы работы и описание этих устройств изложены в работе [47].

Однако более широкое применение получили термические, каталитические, восстановительные и жидкостные нейтрализаторы.

Окислительные каталитические нейтрализаторы служат для окисления СО и СН и эффективно работают при температурах 300–800 °С. В качестве катализаторов используют платину и палладий. Основной недостаток этих нейтрализаторов – проблема выбросов NOx остается нерешенной.

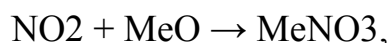
Трехкомпонентные каталитические нейтрализаторы, в которых применяется триметаллический катализатор – платина, палладий, родий в соотношении 1:16:1 или 1:28:1. В этих нейтрализаторах одновременно происходят две реакции: окисления СО и СН в СО<sub>2</sub> и Н<sub>2</sub>О (водяной пар) соответственно, восстановления NOx до азота N<sub>2</sub> и аммиака NH<sub>3</sub> (при работе двигателя на стехиометрической смеси основным продуктом восстановления NO является N<sub>2</sub>, а на богатых смесях образуется больше NH<sub>3</sub>). В качестве восстановителей используются находящиеся в продуктах сгорания СО, СН и Н<sub>2</sub>.

Каталитический нейтрализатор работает наиболее эффективно, если в двигатель подается смесь стехиометрического состава. Основным элементом, обеспечивающим успешное функционирование каталитического нейтрализатора продуктов сгорания, является встраиваемый в выпускную систему датчик концентрации кислорода ( $\lambda$ -зонд), с помощью которого постоянно регулируется состав смеси для получения точного соответствия коэффициента избытка окислителя  $\alpha = 1$ . Датчик определяет содержание O<sub>2</sub> в продуктах сгорания, а его электрический сигнал использует электронный блок управления, который соответственно изменяет количество впрыскиваемого топлива. Принцип действия  $\lambda$ -зонд заключается в способности пропускать через себя ионы кислорода. Если содержание кислорода на активных поверхностях датчика, одна из которых контактирует

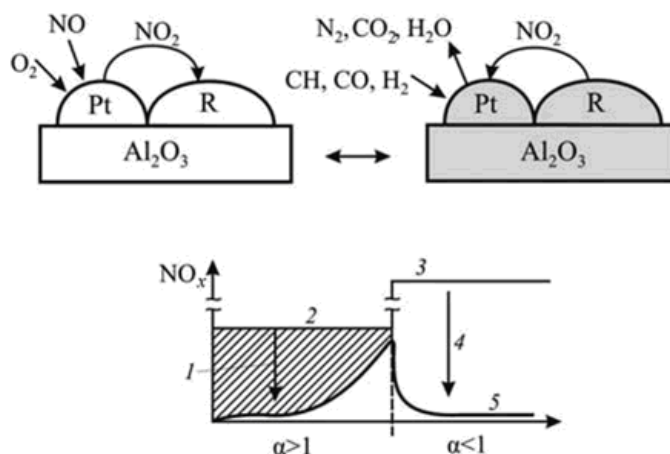


с атмосферой, а другая с продуктами сгорания, значительно отличается, то происходит резкое изменение напряжения на выводах датчика.

Адсорбционно-каталитический нейтрализатор. Данный тип нейтрализаторов применяется в основном для снижения выбросов оксидов азота  $\text{NO}_x$  двигателями с непосредственным впрыском. Механизм действия такого нейтрализатора показан на рисунке 1.4 [46]. Носитель из оксида алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  покрыт катализатором из платины  $\text{Pt}$  и специальным веществом  $R$  (оксидом металла), выполняющим функцию адсорбера. При работе на бедных смесях платиновый катализатор способствует окислению  $\text{NO}$  в  $\text{NO}_2$ , который на материале  $R$  адсорбируется в виде нитратов и нитритов:



где  $\text{Me}$  – металл.



1, 4 – снижение выбросов  $\text{NO}_x$ ;

2, 3 – концентрация  $\text{NO}_x$  на выходе из цилиндра;

5 – концентрация  $\text{NO}_x$  после нейтрализатора.

Рисунок 1.4 - Механизм снижения концентрации  $\text{NO}_x$  в адсорбционно-каталитическом нейтрализаторе [46]

При работе двигателя на стехиометрической и богатых смесях ( $\alpha \leq 1,0$ ) происходит восстановление нитратов на платиновом катализаторе

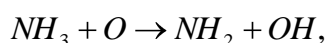
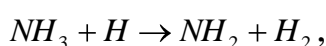
(регенерация) с участием CO, CH и H<sub>2</sub> по реакции  $\text{MeNO}_3 \rightarrow \text{MeO} + \text{NO} + 0,5\text{O}_2$ .

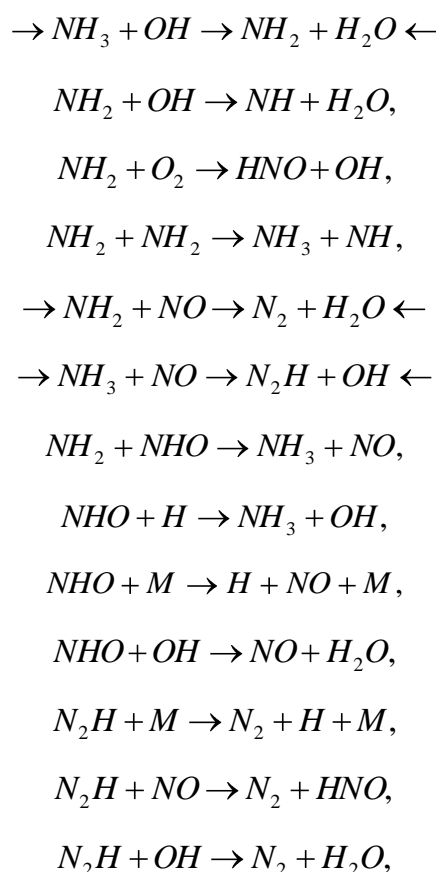
Существенным недостатком адсорбционно-каталитического нейтрализатора является необходимость снижения в бензине содержания серы до 30 ppm и менее, а также необходимость поддержания температуры в диапазоне 250–350 °С для адсорбции, 400–550 °С для регенерации, выше 650 °С для разложения сульфатов.

В бензиновых двигателях используются все перечисленные нейтрализаторы, а в дизелях применяются в основном окислительные каталитические нейтрализаторы (в частности, для легковых автомобилей и малотоннажных грузовиков) для снижения выбросов CO и CH. Однако высокая температура в нейтрализаторе приводит к окислению SO<sub>2</sub> до SO<sub>3</sub> и далее к образованию сульфатов, которые существенно увеличивают содержание твердых частиц. По этой причине использование окислительных каталитических нейтрализаторов для дизелей большегрузных автомобилей нецелесообразно.

Селективные нейтрализаторы. Нейтрализация оксидов азота NO<sub>x</sub> в газотурбинных двигателях, топочных устройствах и некоторых дизельных двигателях осуществляется с помощью селективных нейтрализаторов, работающих с подачей в систему выпуска (до нейтрализатора) аммиака NH<sub>3</sub> или мочевины (NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>.

В случае использования аммиака NH<sub>3</sub> последний, согласно [47], при достаточно высокой температуре реагирует с OH, образуя NH<sub>2</sub>, который вступает в реакцию с оксидом азота NO с образованием H<sub>2</sub>O и N<sub>2</sub> или N<sub>2</sub>H, что в конечном итоге также приводит к образованию N<sub>2</sub>. Наиболее важные элементарные реакции этого процесса имеют следующий вид:





Селективный нейтрализатор каталитического восстановления активен в широком диапазоне температур, однако его работоспособность снижается содержащимися в продуктах сгорания серой и конденсированными микрочастицами [47]. Кроме того, для снижения выбросов СО и СН необходимо использовать дополнительно окислительный каталитический нейтрализатор, что приведет к усложнению конструкции транспортных средств и повысит их стоимость.

#### 1.4 Двигатели с гетерогенным типом горения

Рабочий процесс дизельного двигателя происходит иначе, чем у бензиновых двигателей. В цилиндре сжимается только воздух, и сжимается он с очень высоким, до 30-50 бар, давлением. От сжатия температура воздуха поднимается до 700–900 °С. Топливо в этом случае распыляется прямо в камере сгорания, перед положением ВМТ поршня. Мельчайшие капли

топлива мгновенно испаряются, образуется топливовоздушная смесь. Смесь должна образоваться очень быстро, на порядок быстрее, чем в бензиновом двигателе. Поэтому в камере сгорания образуется неоднородная (гетерогенная) топливовоздушная смесь, которая самовоспламеняется и сгорает.

Сжатие воздуха без топлива дает плюс: устраняется опасность детонации, вследствие чего снимается ограничение по степени сжатия. Степень сжатия дизеля обычно находится в пределах от 13 до 25. Малые значения встречаются у дизелей с наддувом, большие — для атмосферных дизелей с разделенными камерами сгорания. Нижний предел ограничения степени сжатия дизеля задается трудностями с пуском мотора зимой, а верхний ограничивается прочностью деталей: с увеличением степени сжатия растет и предельное давление в камере сгорания.

Поскольку в дизельных двигателях происходит горение гетерогенной смеси, такие двигатели способны работать на бедных и сверхбедных смесях. Это дает им значительное преимущество перед бензиновыми двигателями.

Однако у гетерогенного горения есть и ощутимые минусы. Речь идет о содержании вредных компонентов в выхлопных газах. Работа на бедных смесях и более высокая температура в камере сгорания приводят к тому, в выхлопе дизеля почти вдвое больше оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ), их массовая доля в суммарном выбросе токсичных компонентов — 30-80%. При сгорании гетерогенных смесей образуются твердые частицы, преимущественно, свободный углерод (обычная сажа). Частицы сажи являются сильными адсорбентами для канцерогенных соединений — таких как полициклические ароматические углеводороды. Кроме сажи, среди твердых частиц могут быть несгоревшие частицы топлива и масла, соединения серы и оксиды металлов, добавляемых в топливо и масло в качестве присадок. Всё это и проявляется в виде дымности, вплоть до копоти. Твердые частицы легко переносятся в

воздухе и поэтому могут легко подпортить здоровье людей. Самое же неприятное, что от них очень трудно избавиться. Выхлоп бензинового двигателя возможно сделать чище - оптимизацией рабочего процесса и использованием каталитических нейтрализаторов. Для борьбы с дымностью ограничивают нижний предел качества смеси  $\lambda$  на уровне 1,1–1,2. Однако для дизельных двигателей использование катализаторов затруднено как раз наличием сажи в выхлопе. Она достаточно быстро выводит каталитический нейтрализатор из строя. Использование же сажевого фильтра может решить эту проблему, однако такие фильтры малоэкономичны и эффективность их несовершенна.

## 2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

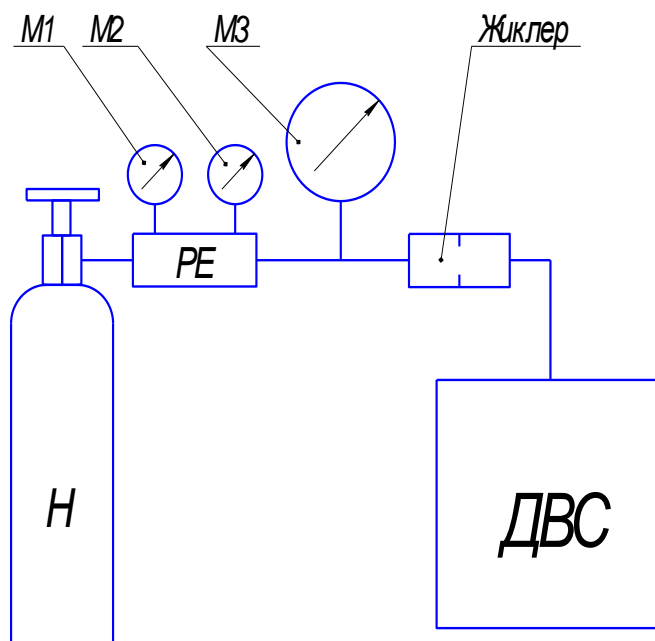
### 2.1 Испытания дизельного двигателя КАМАЗ 740.62 – 280 с добавками водорода

#### 2.1.1 Методика испытаний

Объектами испытаний является поршневой, четырёхтактный дизельный двигатель КАМАЗ 740.62 – 280, рабочим объемом  $V_h = 11,76$  л., степенью сжатия  $\varepsilon = 16,5$  и номинальной мощностью  $N_e = 280$  кВт при частоте вращения коленчатого вала  $n = 1900$  мин<sup>-1</sup>. Конструкция двигателя и всех его систем, условия функционирования разработаны ОАО «КАМАЗ» и соответствуют ТУ по эксплуатации, установленным заводом изготовителем. Экспериментальные исследования проводились в моторном боксе ОАО «КамАЗ», оборудованном индукторным тормозом и измерительным оборудованием соответствующим требованиям ГОСТ Р 41.49 – 2003 (Правила ЕЭК ООН №49).

Дополнительно моторный стенд оснащался системой подачи водорода, схема которой представлена на рисунке 6.

Система подачи водорода включает баллон с водородом (Н), манометры (М1-М3), редуктор (РЕ), жиклёр и соединительную арматуру.



H - баллон с водородом, M1-M2 - манометры,  
PE – редуктор

Рисунок 2.1 – Схема системы подачи водорода в  
ДВС

Система работает следующим образом. Водород, из баллона высокого давления (H) через редуктор (PE) и тарированный жиклер, подавался во впускной коллектор двигателя в сечение, расположенное непосредственно за охладителем наддувочного воздуха. Расход водорода при этом определялся эффективным сечением жиклера. Для исключения влияния изменения давления во впускном коллекторе двигателя на расходные характеристики системы подачи водорода давление перед жиклером поддерживалось на уровне  $\Delta P = 0,35 - 0,5$  МПа, что позволяло обеспечить гарантированный критический перепад давления на жиклере. При проведении работ использовались 3 жиклера с расходными характеристиками, представленными в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Тарировочные характеристики жиклеров

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

Первичные результаты испытаний приведены в таблицах 1-3 (приложение А).

### 2.1.2 Измерительное оборудование

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

Наименование средств измерений и их основные характеристики, входящие в состав стенда приведены в таблице 4.

Таблица 2.2 - Средства измерений и их основные характеристики

Наименование средств измерений	Тип, фирма	Класс точности или погрешность	Диапазон измерений
1	2	3	4
Канал измерения крутящего момента: - тензодатчик	-	не более $\pm 2$	(0 ÷ 190) кг·с
Канал измерения числа оборотов: - датчик числа оборотов	-	$\pm 1,5$	(0 ÷ 4000) мин <sup>-1</sup>
Измеритель давления газа	Манометр МТП-160	$\pm 1,5$ %	(0 ÷ 4,0) кгс/с <sup>2</sup>
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

Продолжение таблицы 5



Наименование средств измерений	Тип, фирма	Класс точности или погрешность	Диапазон измерений
1	2	3	4
Канал измерений температуры масла: - преобразователь - термометр сопротивления	Ш711/1И ТСП	$\pm 2 \%$ $\pm 0,1 \%$	$(0 \div 1000) ^\circ\text{C}$ $(0 \div 120) ^\circ\text{C}$
Канал измерений температуры топлива: - преобразователь - термометр сопротивления	Логометр Л-64 ТСМ	$\pm 1,5 \%$ $\pm 0,1 \%$	$(0 \div 50) ^\circ\text{C}$ $(-50 \div 150) ^\circ\text{C}$
Канал измерений температуры ОГ (2 точки): - преобразователь - термопара	Ш711/1И ХА	$\pm 2 \%$ $\pm 2 \%$	$(0 \div 1000) ^\circ\text{C}$ $(-200 \div 1300) ^\circ\text{C}$
Измеритель атмосферного давления воздуха	Барометр-анероид БАММ-1	1,0	$(80 \div 106) \text{ кПа}$
Измеритель давление масла в двигателе	Манометр ЭКМ	$\pm 1,5 \%$	$(0 \div 1,0) \text{ МПа}$
Измеритель разрежения на впуске	Пьезометр водяной	$\pm 2,0$ мм.вод.ст	$(0 \div 1500)$ мм.вод.ст.
Измеритель давление наддувочного воздуха	Манометр образцовый (МО)	$\pm 0,4 \%$	$(0 \div 250) \text{ кПа}$
Измеритель давления во впускном коллекторе	Моновакумметр	$\pm 1,0 \%$	$(-1,0 \div 3,0) \text{ кгс/с}^2$
Измеритель давления картерных газов	Пьезометр водяной	$\pm 2,0$ мм.вод.ст	$(0 \div 600)$ мм.вод.ст.
Измеритель влажности окружающего воздуха	Психометр аспирационный МВ-4М	0,2	$(10 \div 100) \%$ относ. влаж.
Состав отработавших газов	Газоанализатор фирма «HORIBA»	$\pm 1,0 \%$	$(0 \div 10000) \text{ ppm}$

### 2.1.3 Порядок проведения и объем испытаний

Работы проводились в соответствии с программой испытаний, которая включает подготовку стенда к испытаниям и снятие необходимых характеристик двигателя.

Работы по снятию характеристик ДВС на исследуемых режимах производились в следующей последовательности. Производился пуск двигателя при температуре, влажности и давлении окружающей среды, характерной для моторного бокса. Затем осуществлялся прогрев до рабочей температуры двигателя. Далее устанавливался исследуемый режим работы двигателя и снималась исходная (базовая) характеристика при работе двигателя на дизельном топливе. Затем во впускной коллектор двигателя подавался водород в необходимом количестве. После начала подачи водорода проводилась коррекция режима работы двигателя, и по достижению установившегося режима проводились соответствующие измерения.

Далее в тексте приняты следующие обозначения:

A – 25 – режим работы двигателя, соответствующий  $n = 1180$ , мин<sup>-1</sup>,  
Ne = 31 л.с.

A-100 - режим работы двигателя, соответствующий  $n = 1180$ , мин<sup>-1</sup>,  
Ne = 119 л.с.

C – 25 – режим работы двигателя, соответствующий  $n = 1730$ , мин<sup>-1</sup>,  
Ne = 46 л.с.

C – 100 – режим работы двигателя, соответствующий  $n = 1730$ , мин<sup>-1</sup>,  
Ne = 169 л.с.

D – 25 - режим работы двигателя, соответствующий  $n = 900$ , мин<sup>-1</sup>,  
Ne = 39 л.с.

УВСХ – условная внешняя скоростная характеристика

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

Первичные результаты испытаний в виде таблицы представлены в приложении Б.

## 2.1.4 Основные расчетные зависимости, используемые при обработке результатов испытаний

Коэффициент избытка воздуха, определялся по формуле:

$$\alpha = \frac{G_{\text{в}}}{G_{\text{т}} \cdot l_{0\text{т}} + G_{\text{н}} \cdot l_{0\text{н}}}, \quad (2.1)$$

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.

Количество теплоты подведенного с топливом с учетом добавки водорода определялось по формуле:

$$Q_{\text{СМ}} = G_{\text{т}} H_{\text{и\text{т}}} + G_{\text{н}} H_{\text{и\text{н}}} \quad (2.2)$$

где:  $Q_{\text{СМ}}$  – количество теплоты подведенной к двигателю со смесью топлив, МДж/с;

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

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

Расчет других параметров двигателя осуществлялись по методике ОАО «КамАЗ» в соответствии с ГОСТ Р 41.49 – 2003, в частности расчет массовых расходов выбросов вредных веществ осуществлялся по следующим формулам:

Массовые выбросы  $\text{NO}_x$ , г/ч

$$\text{NO}_{x\text{mass}} = 0,001587 \text{ NO}_x G_{\text{O}_2},$$

Массовые выбросы  $\text{CO}$ , г/ч

$$\text{CO}_{\text{mass}} = 0,000966 \text{ CO } G_{\text{O}_2},$$

Массовые выбросы  $\text{CH}$ , г/ч

$$\text{CH}_{\text{mass}} = 0,000479 \text{ CH } G_{\text{O}_2},$$

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

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

$$G_{ог} = G_{в} + G_{т} + G_{н},$$

$G_{в}$ - массовый расход воздуха через двигатель, кг/ч;

$G_{т}$  - массовый расход дизельного топлива, кг/ч;

$G_{н}$  - массовый расход водорода, кг/ч.

## **2.2 Испытания дизельного двигателя ВАЗ-341 с добавками водорода**

### **2.2.1 Методика испытаний**

Целью испытаний является исследование влияния добавки водорода на показатели дымности дизельного двигателя.

Объектом испытаний является четырехтактный, вихрекамерный, четырёх цилиндровый, рядный дизельный двигатель с рабочим объёмом  $V_h = 1,77\text{м}^3$  и степенью сжатия  $\epsilon = 23$ .

Испытания проводились при температуре, давлении и влажности воздуха соответствующим параметрам окружающей среды.

Дополнительно двигатель был оснащён системой подачи водорода, которая представлена на рисунке 2.1.

Система подачи водорода включает баллон с водородом (Н), манометры (М1-М3), редуктор (РЕ), жиклёр и соединительные шланги, к - кран подачи водорода. Работа системы описана в пункте 2.1.1.

Для иллюстрации на рисунке 2.2 и 2.3 представлен общий вид системы подачи водорода и место подачи водорода во впускной коллектор двигателя



Рисунок 2.2. – Общий вид системы подачи водорода



Рисунок 2.3 – Место подачи водорода во впускной коллектор двигателя

### **2.2.2 Измерительное оборудование**

При проведении испытаний производились измерения параметров двигателя предусмотренные ГОСТ 21393-75:

- температуры охлаждающей жидкости (штатным датчиком температуры);
- дымность отработавших газов определялась дымомером марки МЕТА- 01
- давление водорода (манометр класс точности 2)

### **2.2.3 Порядок проведения и объём испытаний**

Работа проводилась в соответствии с ГОСТ 21393-75 (Автомобили с дизелями. Дымность дизельных двигателей)

Производился пуск двигателя при влажности, температуре и давлении окружающей среды. Затем осуществлялся прогрев до рабочей температуры двигателя  $T=60^{\circ}\text{C}$ . Далее на выхлопную трубу устанавливался прибор, снималась исходные (базовые) характеристика при работе двигателя на дизельном топливе, без водорода, замеры производились на режиме свободного ускорения. Режим свободного ускорения подразумевает - разогнать двигатель от холостых оборотов до максимальных быстрым однократным нажатием на педаль подачи топлива до упора, достичь максимальных оборотов вала и сбросить ее. Затем на впуск двигателя под заданным давлением через тарированный жиклер, путем открытия крана подавался водород, замеры производились аналогично измерениям дымности без водорода.

Расходные характеристики были получены путем метода объёмного истечения газа по ГОСТ 8.207-76.

Таблица 2.2- Расходные характеристика жиклера

Жиклер	№1	№2
Расход водорода $G_H$ , кг/ч	0,02	0,05

### 2.3 Оценка погрешностей измерений

Относительные погрешности измерений величин, предусмотренных ГОСТ 14846-81, принимались равными, значениям, установленным данным ГОСТом.

Оценка погрешностей измерений показателей двигателя точность измерения, которых не предусмотрена ГОСТ 14846-81, в частности расхода воздуха, водорода, а также погрешность определения коэффициента избытка воздуха, как одного из основных факторов, определяющих эффективность работы двигателя, проводились в следующем порядке [35, 36].

Результирующая абсолютная погрешность представлялась как:

$$\Delta = \Delta_c + \Delta_{сл},$$

где  $\Delta_c$  – неисключенная систематическая погрешность;

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

Неисключенная систематическая погрешность определялась по формуле:

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

где  $Q_i$  – граница  $i$ -ой неисключенной систематической погрешности;

$k$  – коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью  $\beta$ , и равный 1,1 при  $\beta = 0,95$ .

В качестве неисключенных систематических погрешностей принимались основная погрешность измерительных средств и субъективная погрешность, которые определялись на основе паспортных данных на

средства измерений (основная) и типа используемых устройств (субъективная).

Случайная составляющая погрешности результатов измерений определялась как:

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

где  $t$  – коэффициент (квантиль) Стьюдента зависящий от количества проведенных опытов и принятой доверительной вероятности;

$S$  – среднее квадратическое отклонение;

$n$  – число результатов наблюдений (повторных опытов).

Величина  $S$  определялась по формуле:

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

где  $X_i$  –  $i$ -ый результат измерений,

$\bar{X}$  – среднеарифметическое значение, определяемое как

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

Результирующая погрешность определялась в зависимости от отношения:

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

В случае если расчетная величина  $\phi$  находится в диапазоне  $0,8 < \phi < 8$ , то суммарная погрешность находится построением композиции распределений случайных и не исключенных систематических погрешностей, рассматриваемых как случайные величины:

$$\Delta = S \cdot K,$$

где  $K$  – коэффициент, зависящий от соотношения случайной и не исключенной систематической погрешностей;



$S^{\wedge}$  - оценка суммарного среднего квадратического отклонения результата измерения.

Величины  $K$  и  $S^{\wedge}$  определяются по формулам:

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

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

Результирующая относительная погрешность определялась как отношение абсолютной погрешности к измеренному значению.

Расчеты, проведенные по указанной выше методике показали, что относительная погрешность измерения для расхода водорода составила  $\delta_{G_H} = \pm 5\%$ .

Погрешность измерения расхода воздуха через двигателя методом насадок в соответствии с рекомендациями [23] принималась равной  $\delta_B = \pm 2\%$ .

Необходимо отметить, что погрешность измерения расхода топлива (природного газа) принималась в соответствии с ГОСТом  $\delta_{G_2} = \pm 1\%$ . Погрешности прямых измерений не указанных выше величин принимались равными, основным погрешностям приборов измеряющих их и приведенных в таблице 2.

Относительная погрешность коэффициента избытка воздуха, определялась в соответствии с методикой оценки косвенных измерений [30, 31]. При этом величина абсолютной предельной погрешности с принятой надёжностью (доверительной вероятностью), равной  $\beta = 0,95$  определяется по формуле 9:

$$\Delta = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left( \frac{\partial f(x_1, x_2, \dots, x_m)}{\partial x_i} \right)^2 t_\alpha s_i^2}, \quad (9)$$

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;

$t_\alpha$  - квантиль распределения Стьюдента;

$s_i$  - оценка дисперсии  $i$ -го прямого измерения;

$m$  - количество аргументов функции.

Дифференцирование выражения 8 в соответствии с формулой 10 позволяет получить следующее выражение для абсолютной погрешности:

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

Относительная погрешность определялась в соответствии с формулой:

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

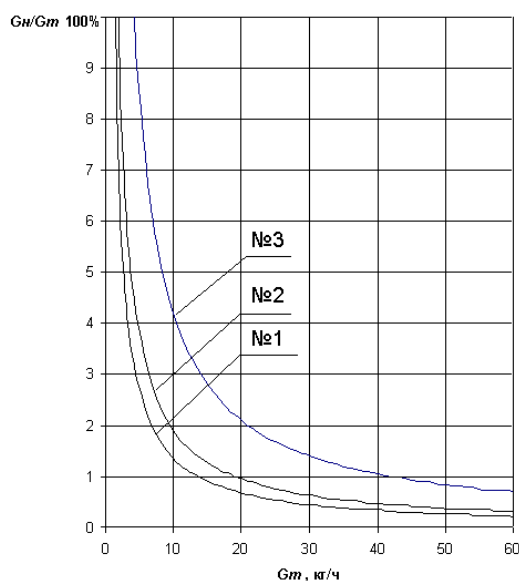
В результате проведенных расчётов было получено, что суммарная относительная погрешность определения  $\alpha$  в диапазоне изменений измеряемых величин находится в пределах  $\delta_\alpha = 3 - 5 \% .,$

### 3 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

#### 3.1 Результаты испытаний дизельного ДВС с добавками водорода

Основные результаты испытаний в виде таблиц и графиков приведены в приложении В. В частности, на рисунках В1 - В5 приведены характеристики двигателя без добавки водорода (базовые) и с добавкой водорода.

Необходимо отметить, что при проведении испытаний количество подаваемого водорода в двигатель определялось жиклером, имеющий определенную расходную характеристику. В результате, процентное отношение водорода к топливу впрыскиваемое в ДВС на различных режимах было неодинаковым. Для удобства дальнейшего анализа на рисунке 3.1 представлено процентное изменение массового соотношения водород – дизельное топливо при использовании различных жиклеров.

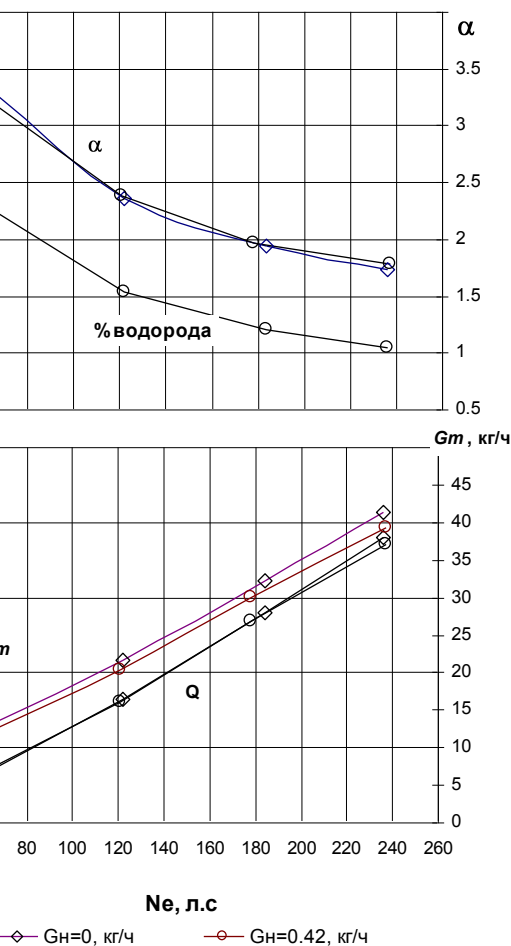


№1 – расход водорода  $G_H = 0,135$ , кг/ч; №2 – расход водорода  $G_H = 0,19$ , кг/ч; №3 – расход водорода  $G_H = 0,42$ , кг/ч;

Рисунок 3.1 - Массовое отношение водород – дизельное топливо

Известно, что химический состав углеводородного топлива используемого в ДВС, в частности дизельного топлива, может меняться в довольно широких пределах и зависит от множества факторов, таких как месторождение нефти, способ получения топлива, наличие присадок и т.д. [37]. На основании этого примем, что добавка водорода в количестве менее 1-го % не будет оказывать значимого влияния на мощностные и экономические параметры двигателя. Это подтверждается и экспериментально, при соотношении добавляемого водорода к топливу менее 1-го % по массе параметры двигателя изменяются в диапазоне принятых погрешностей измерений (см. рисунки приложения В). Поэтому результаты экспериментов при добавке водорода менее 1-го % при анализе мощностных и экономических параметров двигателя можно исключить из дальнейшего рассмотрения.

### 3.2 Оценка влияния добавки водорода на мощностные и экономические показатели дизельного двигателя



еет почти в три раза большую низшую теплотворную авнению с дизельным топливом [5], однако его плотность ыше плотности дизельного топлива. Это может оказать юстные характеристики двигателя [12, 7]. Для оценки водорода на мощностные характеристики были сняты е скоростные характеристики двигателя (УВСХ) без и с максимальной возможной подачей водорода (см. жения В.), которую способна обеспечить применяемая кг/ч). При этом массовое соотношение водород-дизельное ых скоростных режимах варировалось в диапазоне 2 – 2,5 ения коленчатого вала  $900 \text{ мин}^{-1}$  и менее 1 % при частоте унка можно видеть, что при добавке водорода мощность

двигателя не меняется. На основании этого можно сделать вывод о том, что добавка водорода, в количестве обеспечивающиеся системой подачи водорода, не изменяет мощностные параметры двигателя.

Экономичность двигателя определяется степенью эффективного использования подведенной с топливом теплоты [8], и количественно оценивается величиной удельного эффективного расхода топлива:

$$g_e = Gm/Ne.$$

где  $Gm$  – расход топлива, кг/ч;

$Ne$  – эффективная мощность двигателя, л.с.

На рисунках приложения В представлено изменение  $g_e$  в зависимости от частоты вращения коленчатого вала двигателя, из которых видно, что при добавках водорода удельный эффективный расход топлива уменьшается. Однако, использовать указанную величину в качестве критерия оценки экономичности при добавке водорода в двигатель не корректно, т.к. при добавке водорода изменяются теплофизические свойства топлива (рабочей смеси) [9]. Поэтому дальнейшая оценка экономических параметров двигателя при добавке водорода проводилась по двум параметрам:  $Q$ , МДж/с – общее количество тепла поступившее в цилиндры двигателя с дизельным топливом и водородом в единицу времени и  $\eta_e$  - эффективное КПД двигателя.

На рисунках приложения В и рисунке 3.2 представлены графики изменения количества теплоты ( $Q$ , МДж/с) подведенной к двигателю, как в случае использования добавки водорода, так и без нее. Из рисунков можно видеть, что общее количество теплоты подведенного к двигателю на идентичных режимах его работы во всех случаях практически одинаково. Расход дизельного топлива  $Gm$  при этом уменьшается пропорционально количеству водорода добавляемого в двигатель. Для иллюстрации этого на рисунке 16 представлено характерное изменение расхода топлива и общего

количества теплоты подведенной к двигателю в зависимости от процента добавки водорода. Некоторое увеличение величины  $Q$  обусловлено погрешностями измерений.

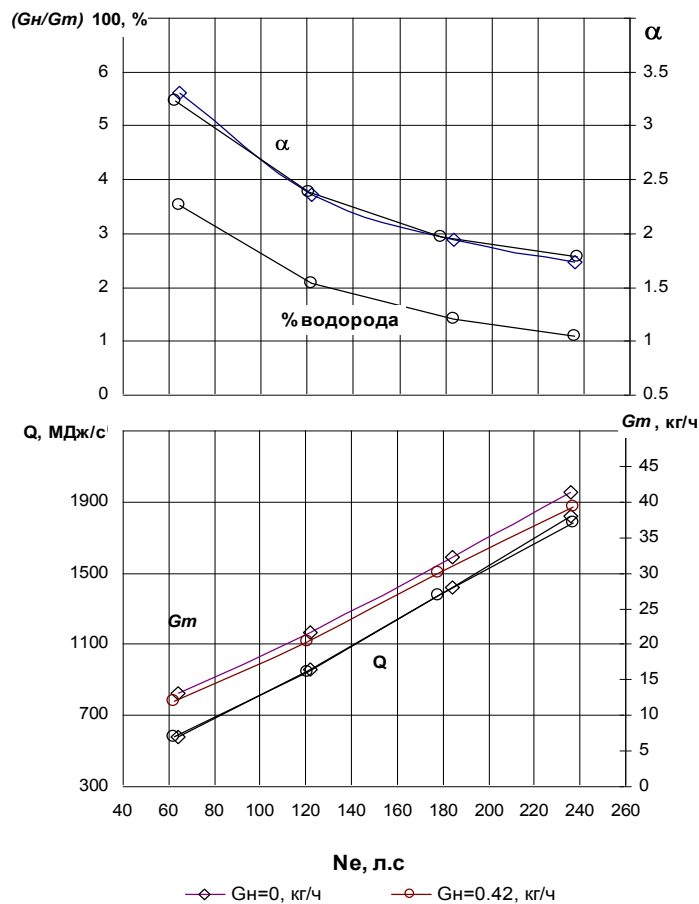


Рисунок 3.2 – Нагрузочная характеристика двигателя ( $n = 1450 \text{ мин}^{-1}$ )

Дальнейший анализ результатов экспериментов позволил установить, что расход дизельного топлива подчиняется следующей зависимости:

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

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 водорода и дизельного топлива соответственно.

Представленная зависимость позволяет оценить расход топлива при использовании добавки водорода с погрешностью 5 % [10].

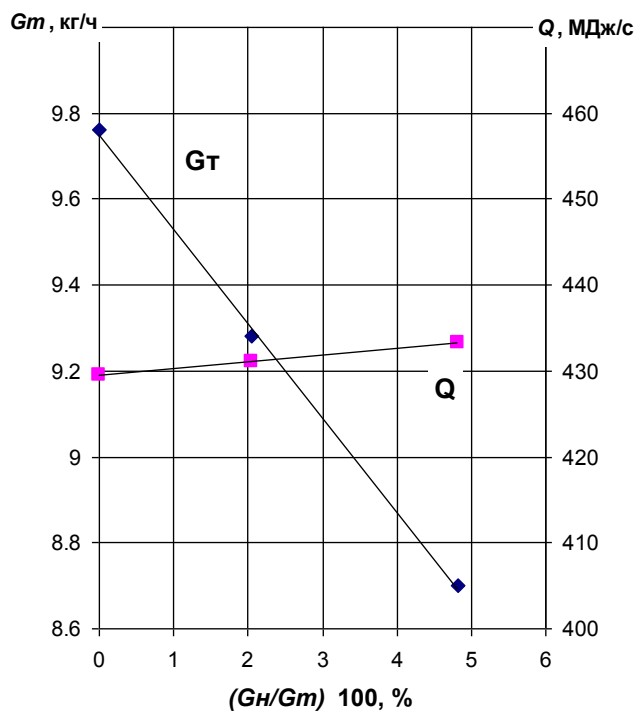


Рисунок 3.3 – Изменение  $G_m$  и  $Q$  в зависимости от процента добавки водорода ( $N_e = 42$  л.с.,  $n = 1180$  мин<sup>-1</sup>)

Анализ результатов показал, что добавка водорода на исследованных режимах работы двигателя при принятых условиях не оказывает практически значимого влияния на КПД двигателя. Наглядно данный вывод подтверждается результатами, представленными на рисунке 3.4, где показано изменение эффективного КПД двигателя на различных режимах его работы.

Следует отметить, что при  $n = 1730$  эффективное КПД двигателя существенно отличаются по причине допущенных неточностей при измерении расхода топлива.

Исключением является режим XX, где количество подведенной теплоты к двигателю при добавке водорода заметно увеличивается. (см. рисунок 3.5). Это объясняется, вероятнее всего, невозможностью

дальнейшего уменьшения цикловой подачи топлива ТНВД при увеличении количества водорода.

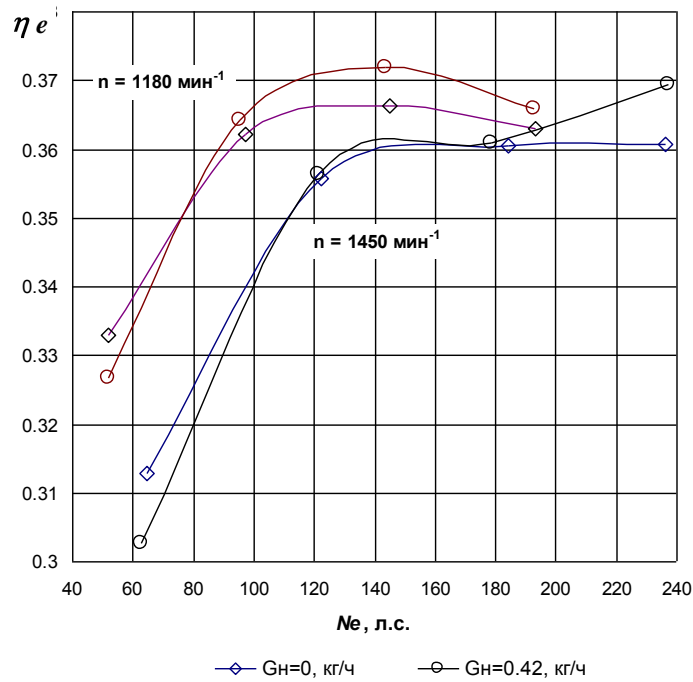


Рисунок 3.4 – Изменение эффективного КПД двигателя

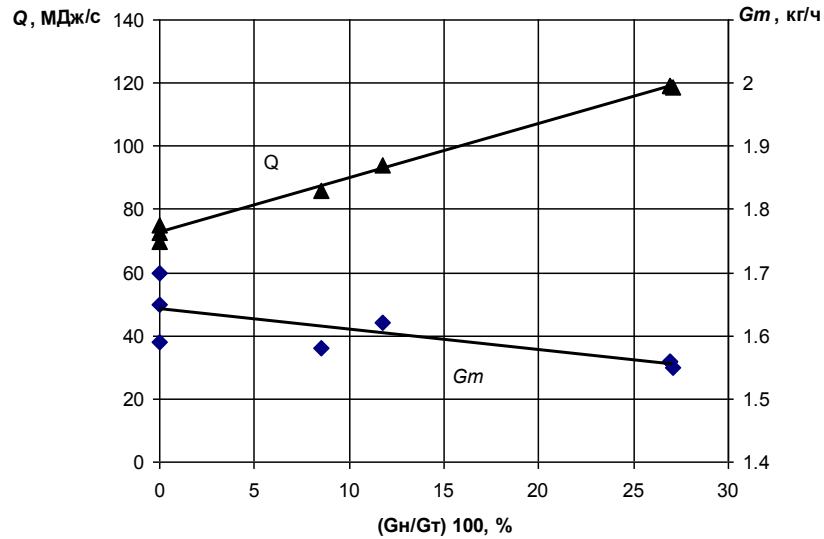


Рисунок 3.5 – Изменение  $G_n$  и  $Q$  в зависимости от процента добавки водорода на режиме ХХ ( $n = 600 \text{ мин}^{-1}$ ).

На основании вышесказанного можно сделать вывод, что добавка в принятом диапазоне изменения расхода водорода на исследованных режимах



не оказывает практически значимого влияния на эффективный КПД двигателя.

### **3.2 Оценка влияния добавки водорода на экологические показатели дизельного двигателя**

Вследствие высокой химической активности добавка водорода даже в небольших количествах, может оказывать влияние на токсичность двигателя [7, 11].

При анализе результатов необходимо учитывать расположение магистрали подачи водорода во впускном коллекторе двигателя, которая смещена 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 приложения Б). При работе двигателя без водорода разница температур не превышает величину, примерно 10-20 °С. Это свидетельствует о большой неравномерности распределения водорода между правой и левой секциями двигателя. Такое неравномерное распределение температуры ОГ может оказать значительное влияние на параметры двигателя, особенно на его токсичность.

#### **3.2.1 Продукты неполного сгорания**

К продуктам неполного сгорания относятся следующие нормируемые токсичные компоненты: CO – оксид углерода, CH – несгоревшие углеводород, C – углерод.

Выбросы оксида углерода CO.

На рисунках приложения Б представлено изменение указанного компонента в зависимости от нагрузки и скоростного режима работы двигателя. Можно видеть, что добавка в принятом диапазоне расходов

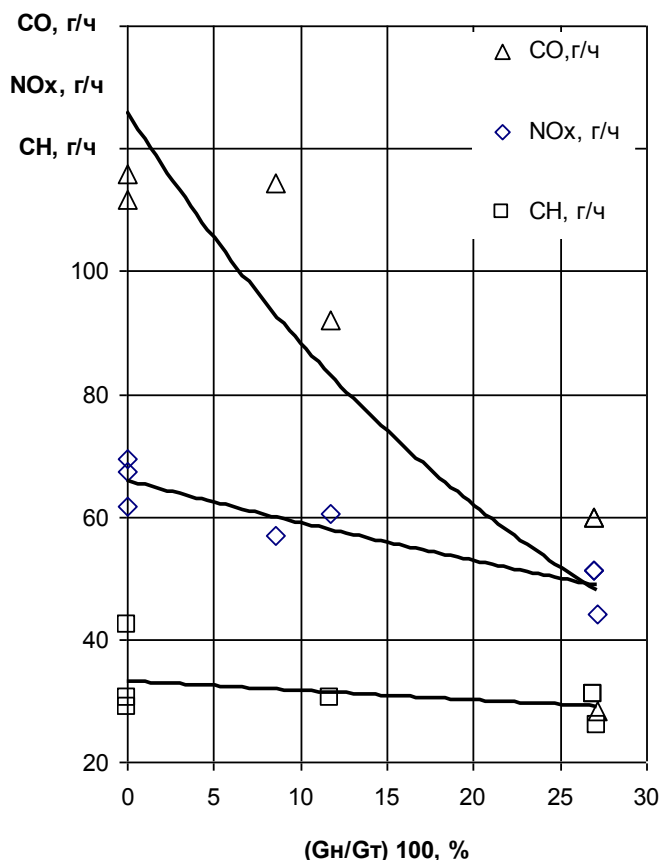


Рисунок 3.6 – Изменение выбросов CH, CO, NOx в зависимости от % добавки водорода в ТВС на режиме XX

еще более низкий процент.

Исключением является режимы XX, где указанный компонент при добавке водорода уменьшается примерно на 40 % (см. рисунок 8). Объяснение этому может служить тот факт, что при работе на этом режиме имеет место уменьшение коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ , с значения  $\alpha = 9$  при работе без водорода до  $\alpha = 7$  и существенная величина добавки водорода (около 25 %), при сохранении температурного режима сгорания топлива, о чем свидетельствует температура ОГ которая практически не меняется. Необходимо отметить, что коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  при добавке водорода на других режимах работы двигателя практически не изменялся.

водорода оказывает незначительное влияние на массовые выбросы CO. Для иллюстрации на рисунке 3.6 представлены регулировочная зависимость выбросов от % добавляемого водорода. Из рисунка видна тенденция к снижению CO, тем не менее в процентном отношении это составляет всего примерно 10%. С увеличением нагрузки и скоростного режима снижение CO составляет

Испытания двигателя по 13-ти ступенчатому циклу показали, что при использовании добавки водорода в количестве  $G_H = 0,42$  кг/ч снижает выбросы CO всего на 5 %.

Выбросы несгоревших углеводородов СН.

На рисунке 3.5 и 3.6 представлено изменение выбросов СН на режиме ХХ и D - 25. Можно видеть, что выбросы СН уменьшаются. Аналогичная картина имеет место на других режимах работы двигателя (см. рисунки приложения Б). При

этом интенсивность снижения СН больше на режимах малой нагрузки и ХХ, где отношение водород-дизельное топливо

выше. Рассмотрение

рисунков приложения Б показывают, что характер изменения выбросов СН при добавке водорода не

меняется, при этом абсолютные значения выбросов СН в массовом выражении при добавке водорода уменьшаются с средним на 20-50 % а зависимости от режима работы и процентного соотношения водород – дизельное топливо. Необходимо отметить, что снижение СН происходит не пропорционально уменьшению расхода топлива. Наглядно это видно на рисунке 3.7, где представлено характерное изменение расхода топлива  $G_m$  и снижение выбросов СН выраженное в относительных процентах в зависимости от нагрузки и определенных по формулам:

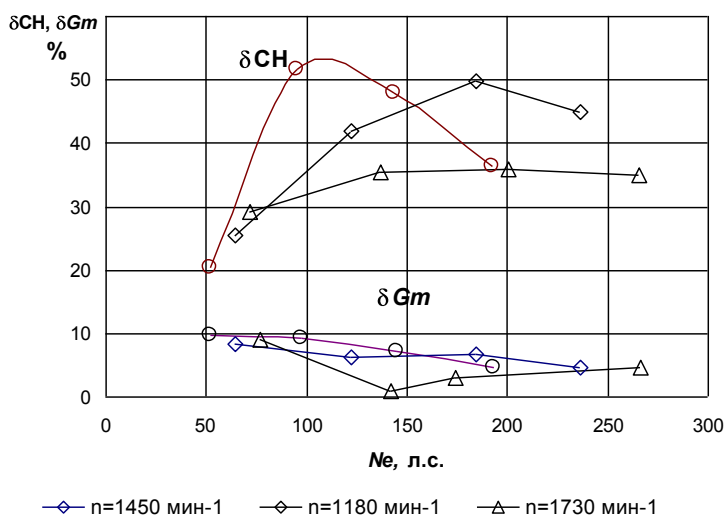


Рисунок 3.7 - Уменьшение расхода топлива  $\delta G_m$  и снижение выбросов  $\delta CH$  выраженное в относительных процентах.

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

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

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

$CH$  – массовые выбросы несгоревших углеводородов без использования добавки водорода.

Уменьшение выбросов  $CH$  при 13-ти ступенчатом цикле испытаний двигателя по ГОСТ Р 41-49-2003 составило около 40%, что подтверждает представленные выше результаты.

Дымность ОГ и выбросы твердых частиц.

Оценка дымности ОГ проводилась методом оптической прозрачности среды (метод Bosh). Количество твердых частиц в ОГ оценивалась методом осаждения частиц на фильтре. Методики измерений дымности и твердых частиц соответствовали ГОСТ Р 41-49-2003.

Результаты измерений выбросов твердых частиц ( $P_t$ ) и дымности ( $K_x$ ) неоднозначны. 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  $K_x$ . Однако, результаты испытаний двигателя по циклу ESC показывают прямо противоположные результаты, при этом снижение по выбросам частиц  $P_t$  составило примерно 30 %.

Следует отметить, что при измерении выбросов твердых частиц было зафиксировано уменьшение массы образца полученного при испытаниях двигателя с добавкой водорода при повторном его взвешивании через 12 часов после проведения замера и в течении этого срока находящегося в кондиционируемом шкафу. Снижение массы составило примерно 30-50 % от исходной. Повторное взвешивание образца полученного без использования водорода во всех случаях оставалось неизменной. Объяснение этому может

служить, то, что при добавке водорода количество паров воды образующейся в ОГ увеличивается (т.к. продуктом полного сгорания водорода являются пары воды), которые могут осаждаться на фильтре и затем в течении определенного срока испаряются. Однако, это предположение требует детального изучения.

Для оценки влияния водорода на показатели дымности дизельного двигателя дополнительно были проведены экспериментальные исследования на двигателе ВАЗ-341 по методике описанной в п.п. 2.2. Первичные результаты исследования представлены в приложении Б.

На рисунке 3.8 и 3.9. показаны зависимости полученных значений достоверного массива измерений дымности по времени.

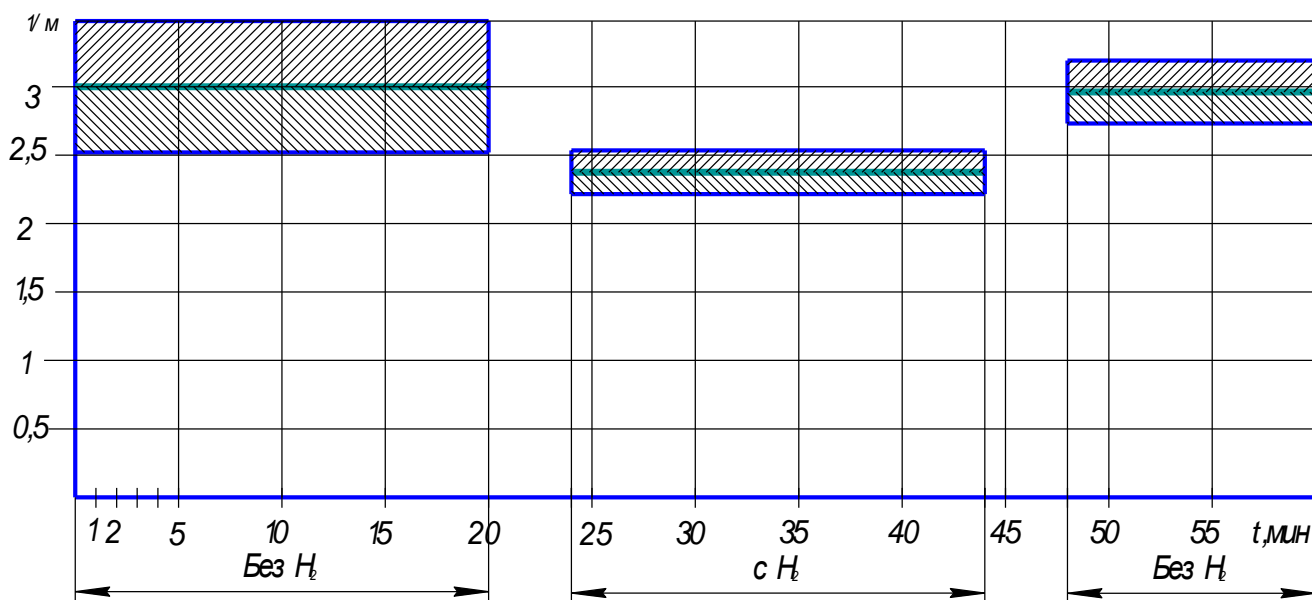


Рисунок 2 – График зависимости дымности ( $1/\text{м}$ ) выхлопных газов от времени при проведении испытаний с жиклером №1.

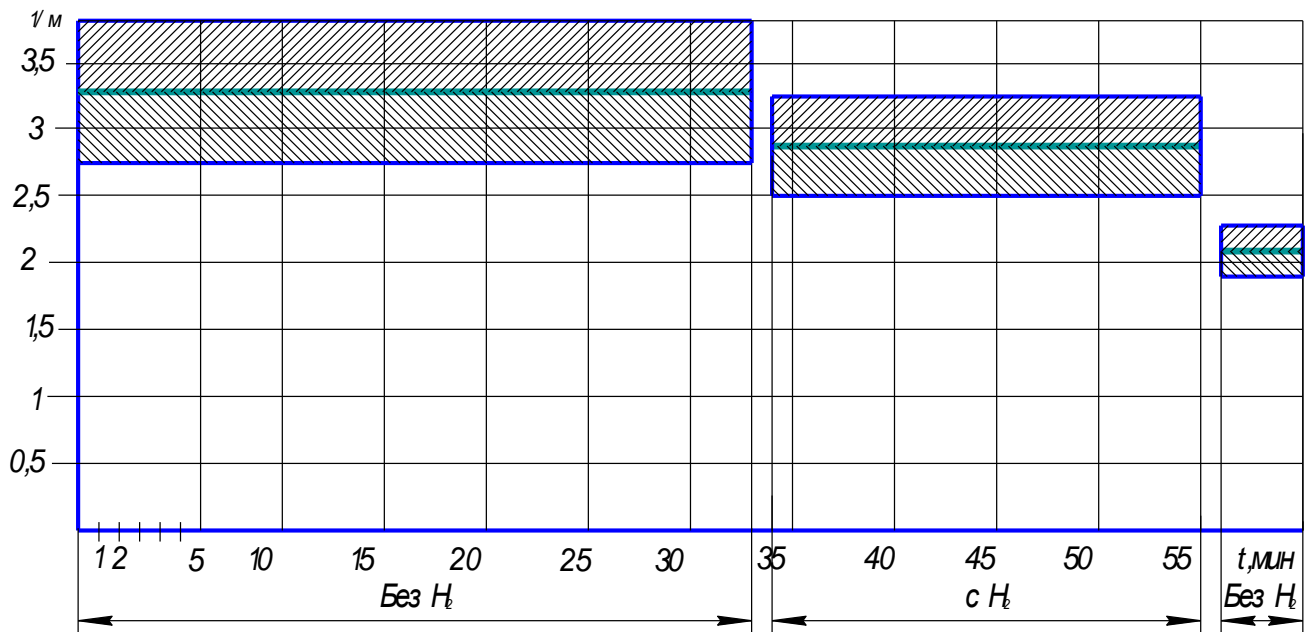


Рисунок 3.9 – График зависимости показаний дымности (1/м) выхлопных газов от времени при проведении испытаний с жиклером №2

Из представленных рисунков видно, что при добавке водорода в имеет место снижение дымности. Однако, при дальнейшей работе и отключении водорода дымность остается практически на том же уровне, что и при добавке водорода. При этом дальнейшая длительная (более 4 часов) работа двигателя без добавки водорода приводит к постепенному увеличению дымности до прежнего уровня. В целом по результатам испытаний на дымность двигателя ВАЗ-341 можно сделать следующие выводы:

- при использовании жиклера №1 количество сажи снизилось в среднем на 20 %.
- при использовании жиклера №2 за исключением результата на интервале 56-60 мин объясненного выше, количество сажи снизилось в на 12,5 %.

Полученные результаты испытаний не позволяют сделать однозначный вывод о влиянии добавки водорода на выбросы твердых частиц и дымность ОГ. Необходимо проведение дополнительных более подробных исследований, включающие повторные эксперименты для статистического анализа и систематизации полученных данных, а также пересмотр методологии измерения твердых частиц при использовании добавки водорода.

### **3.2.2 Выбросы оксида азота NO<sub>x</sub>**

Теоретически с увеличением количества добавляемого водорода NO<sub>x</sub> увеличиваются, вследствие увеличения температуры сгорания, которая является определяющим фактором [12] для их образования. В частности из рисунка 7 можно видеть что на режиме работы двигателя D-25 с увеличением добавки водорода выбросы NO<sub>x</sub> увеличиваются пропорционально добавке водорода (примерно на 5% при добавке водорода 3%). Однако результаты измерений выбросов оксида азота NO<sub>x</sub> на скоростных и нагрузочных режимах работы двигателя представленные на рисунках приложения Б показывают, что на исследуемых режимах выбросы NO<sub>x</sub> при добавке водорода остаются практически на исходном уровне. Это объясняется тем, что количество водорода добавляемого на этих режимах слишком мало, для оказания заметного влияния на температуру сгорания рабочей смеси. Максимальное отношение водород – дизельное топливо на указанных режимах составляет величину не более 3 %. При этом общее количество теплоты подведенной к двигателю оставалось на идентичных режимах одинаковым.

На режиме XX где процентное отношение водорода к дизельному топливу изменялось до величины порядка 25%. На рисунке 8 представлено изменение массовых выбросов NO<sub>x</sub> на режиме XX. Из рисунка видно, что с увеличением добавки водорода наряду с уменьшением количества выбросов

продуктов неполного сгорания (что объясняется некоторым увеличением полноты сгорания и дожигание в процессе выпуска ОГ) имеет место и снижение выбросов NOx. По-видимому, объясняется это тем, что двигатель на режиме ХХ работает на очень бедных смесях с коэффициентом избытка воздуха более 7 и температура сгорания в этих условиях практически не меняется, о чем косвенно свидетельствует температура ОГ. В этих условиях основным фактором определяющим выход NOx будет является концентрация свободного кислорода в ОГ, которая ниже при использовании добавки водорода.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что в принятом диапазоне изменения расхода водорода на исследованных режимах добавка водорода не оказывает практически значимого влияния на выбросы NOx. Это подтверждается и 13-ти ступенчатым циклом испытаний по ГОСТ Р 41.49 – 2003, где увеличение количества NOx при добавке водорода в количестве 0,42 кг/ч составило всего 3%.



## 4 ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДОРОДОСОДЕРЖАЩЕГО ГАЗА В ДВИГАТЕЛЯХ С ГЕТЕРОГЕННЫМ СПОСОБОМ СМЕСЕОБРАЗОВАНИЯ

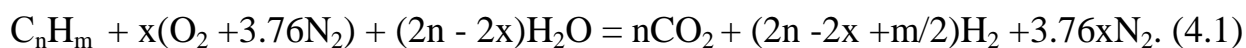
### 4.1 Получение синтез-газа из дизельного топлива

Применение водорода в чистом виде является сложной технической задачей, связанной с рядом, прежде всего, эксплуатационных проблем. К таким проблемам можно отнести хранение водорода на борту, автомобиля в достаточном количестве, наличие необходимой инфраструктуры и т.д. Одним из возможных вариантов устранения этих недостатков может являться применение синтез-газа.

На борту транспортного средства синтез-газ может быть получен автотермическим риформингом или парциальным окислением предварительно испаренного дизельного топлива или бензина. Главными проблемами, возникающими при проведении процесса риформинга, являются коксование катализаторов и их деградация при взаимодействии с содержащими серу компонентами. Порядок удельной активности используемых катализаторов принято считать следующим: Ru, Rh>Ir>Ni, Pt, Pd. В связи с низкой стоимостью, в настоящее время наиболее часто применяются никелевые катализаторы. Для уменьшения коксования в их состав включают оксиды щелочноземельных металлов, оксиды титана или лантана. При приготовлении других катализаторов для обеспечения высокой устойчивости к коксованию и сульфурзации в их состав вводят небольшие количества металлов платиновой группы (один компонент или комбинация нескольких металлов). Кроме того, носитель из окиси алюминия модифицируют добавками оксидов церия или лантана.

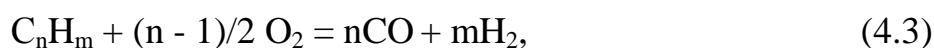
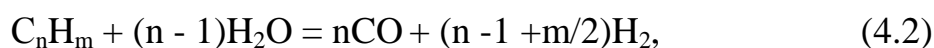
Дизельное топливо и бензин являются сложной смесью различных углеводородов и это существенно усложняет проведение с ними

экспериментальных и теоретических исследований. В настоящее время нет единого подхода к возможной схеме протекания брутто-реакций при автотермической конверсии такого топлива. Так в [40] предлагается схема, основанная на полном окислении углерода, содержащегося в топливе, до  $\text{CO}_2$ :



Однако данное уравнение не описывает наличие метана в продуктах реакции, экспериментально обнаруженного в ряде работ [48-51].

В работе [52] для описания автотермической конверсии предлагается иная схема протекания реакций:



Данная схема объясняет появление метана в продуктах реакции, но, как утверждается в [50], протекание реакции метанирования (4.5) при условиях автотермической конверсии термодинамически неосуществимо. И в [50] предлагается следующая схема:



Дальнейшее осуществление реакции происходит посредством конверсии углеводородов  $\text{C}_{n-1}\text{H}_{m-4}$  в  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  и остаточные углеводороды. Эта схема описывает появление метана в продуктах реакции, но также требует проведения детальных кинетических исследований по ее проверке.

Отсутствие достаточно обоснованных схем протекания реакции автотермической конверсии дизельного топлива и бензина привело к попыткам исследования конверсии на индивидуальных углеводородах, моделирующих реальное топливо. В качестве таковых углеводородов обычно

используются декан, декалин, тетрадекан, 1-метилнафталин [50, 51]. Исследования, проведенные в [50] на платиновом катализаторе и индивидуальных углеводородах, показали, что по скоростям реакций получения синтез-газа углеводороды располагаются в последовательности:

ароматика  $\ll$  нафтены  $<$  парафины

Также было получено, что при малых временах контакта (объемной скорости 50000-100000 час<sup>-1</sup>) и невысоких температурах в продуктах реакции содержатся альдегиды, кетоны, продукты реакций крекинга, дегидрирования ароматики и т.д. При увеличении температуры и увеличении времени контакта (снижении объемной скорости смеси) увеличивается выход водорода и CO, что свидетельствует о дальнейшем превращении всех промежуточных веществ в конечные продукты реакции. Максимальный выход водорода наблюдается при объемной скорости 2000-10000 час<sup>-1</sup> и температурах 840-880°C [50].

Эксперименты, выполненные в [53] по влиянию условий проведения реакции на выход водорода показали, что отношение H<sub>2</sub>O/C при изменении его в интервале 1-3 довольно слабо влияет на концентрацию водорода в продуктах реакции, но его увеличение подавляет коксообразование при снижении общей эффективности. Максимальный выход водорода наблюдается при отношении O/C=0.7-1.2, но сильно зависит от типа конвертируемых углеводородов. Однако эти результаты противоречат данным [54], где была предпринята попытка получить кинетическое уравнение для наблюдаемой реакции риформинга и был получен примерно первый порядок скорости реакции по воде и близкий к нулевому порядок реакции по кислороду.

В [48, 55] на реакции автотермической конверсии бензина было показано, что Rh и Rh-Pt с добавками Gd и CeO<sub>2</sub> обеспечивают выход 8.7 и 9.3 моля водорода на моль бензина при температурах 700-750°C.

Катализаторы на основе платины при этих же условиях обеспечивают выход только 2.5 моля водорода. При этом выход метана составляет 0.4 моля на моль бензина. Добавка сернистых соединений на уровне 30-50 ppm значительно снижает активность катализаторов. Однако при повышении температуры реакции до 800°C влияние серы значительно уменьшается, особенно для катализаторов Rh/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. В этих работах также отмечено значительное влияние носителя на выход водорода. Так при использовании в качестве катализатора Rh/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> выход водорода составляет 12 молей на моль бензина, на катализаторе Rh/CeO<sub>2</sub> эта величина равна 7 молей на моль бензина, для катализаторов на основе перовскитов выход соответственно равен 8 молей на моль бензина.

Подводя итог этому краткому анализу, можно утверждать, что наиболее перспективными катализаторами автотермической конверсии дизельного топлива или бензина могут быть катализаторы, которые будут обеспечивать выход водорода на уровне 12 молей (или больше) на один моль топлива. Реакцию риформинга желательно проводить при температурах не ниже 800°C при объемной скорости 2000-10000 час<sup>-1</sup>, что будет гарантировать незначительное влияние сернистых соединений на деградацию катализатора и минимальное коксообразование. Другими оптимальными величинами проведения процесса являются соотношения H<sub>2</sub>O/C = 1-3 и O/C=0.7-1.2.

Необходимость использования катализаторов конверсии дизельного топлива или бензина в таких специфических условиях, как бортовые генераторы получения синтез-газа, формулирует новые требования к их свойствам, разработке и применению. Важнейшими из них являются следующие:

- высокая термостабильность и окалиностойкость катализатора и носителя;
- теплопроводность слоя катализатора на уровне 1-5 ватт/мК;

- ресурс катализатора не менее 6000 часов;
- возможность использования катализатора в качестве структурных элементов конструкции реактора;
- низкая стоимость;
- соответствие коэффициентов теплового расширения материала носителя и каталитически активного слоя;
- хорошая адгезия слоя катализатора и металлической поверхности.

На основании ранее проведенных в ИК СО РАН исследований можно утверждать, что структурированные катализаторы на сетчатых носителях со значительной продольной и радиальной теплопроводностью могут служить основой для разработки катализаторов автотермического риформинга дизельного топлива и бензина. В Институте катализа была разработана технология приготовления структурированных армированных катализаторов. В конечном варианте последовательность выполнения операций для приготовления катализаторов по усовершенствованной технологии имела следующий вид:

**1 Зачистка и отжиг армирующей сетки** проводились при 600°C с тем, чтобы удалить защитное покрытие и улучшить формовочные свойства.

**2 Приготовление коллоидного раствора** включает в себя растворение в растворах кислот таких материалов как силикагель или окислы алюминия для получения коллоидной фазы.

**3 Приготовление пористого носителя в армирующей сетке** включает в себя пропитку отожженного носителя коллоидным раствором. Пропитка повторялась 3 раза при температуре 120°C. Между пропитками проводились краткосрочные термообработки при температуре 450-500°C. Процедура приготовления пористого носителя заканчивалась после того, как вес сетки увеличивался на 15-20%.

**4 Осаждение активного компонента.** Приготовленный катализатор несколько раз пропитывался в водном растворе солей с заданным отношением активных компонентов. После каждого процесса пропитки образец на короткий период нагревался до 300-350°C.

**5 Термообработка** проводилась в течение 4-5 часов. Температура термообработки зависела от термостойкости активного компонента.

**6 Нарезание лент** армированного катализатора заданной ширины. Ленты гофрировали с помощью специально разработанных гофропрессов.

**7 Приготовление катализаторов регулярной структуры.**

На основании разработанной технологии были приготовлены и испытаны образцы катализаторов автотермического риформинга дизельного топлива и бензина, содержащие в качестве активного компонента Pt, Co и Mn.

Для иллюстрации выполнения операций по приготовлению катализаторов на рисунке 4.1 и 4.2 приведены фотографии, иллюстрирующие промежуточные операции приготовления катализаторов и образцы приготовленных блочных катализаторов.

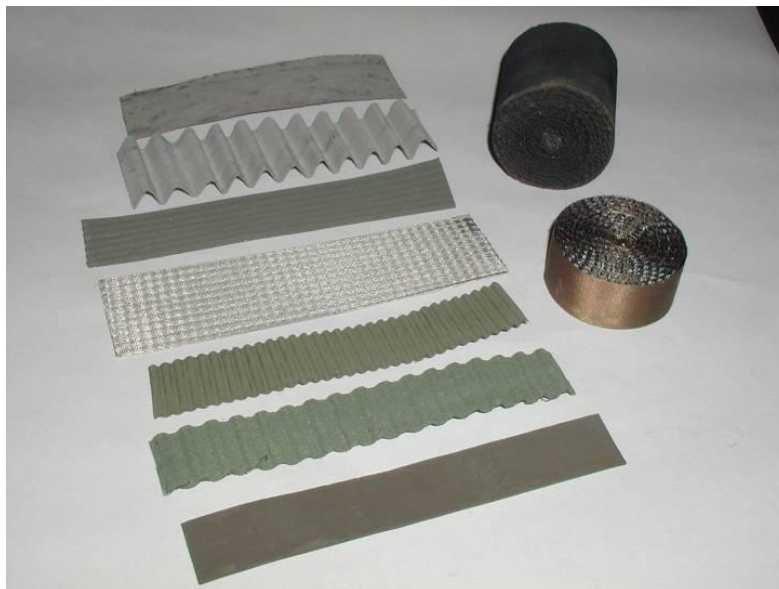


Рисунок 4.1 - Промежуточные операции приготовления катализаторов и образцы приготовленных блочных катализаторов.



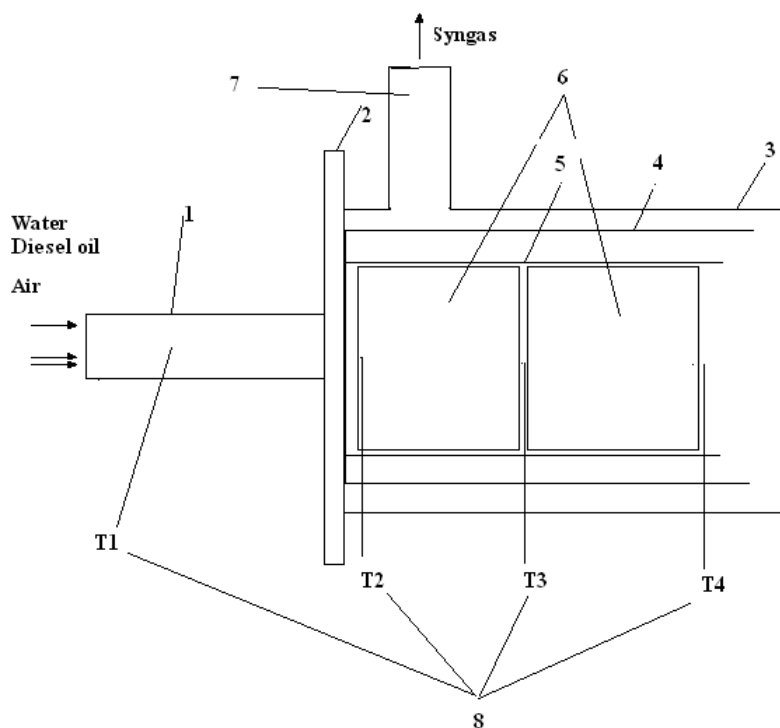
Рисунок 4.2 - Общий вид блочных катализаторов.

Блочный катализатор представляет собой монолит, образующийся из плоских и гофрированных газопроницаемых лент катализатора. Таким образом, образуется пористая структура, состоящая из крупных транспортных пор – каналов (за счет гофр) и мелких пор (за счет пористости сетки). Это создает благоприятные условия для протекания высокоинтенсивных каталитических процессов, каковым является автотермический риформинг дизельного топлива или бензина в области высоких температур. Размеры блочного катализатора: диаметр – 55 мм, длина – 55 мм.

Принципиальная схема автотермического риформера дизельного топлива или бензина представлена на рисунке 4.3.

Реактор представляет собой конструкцию коаксиального типа с расположенным в ней регулярным структурированным катализатором осевого типа. Реактор был изготовлен из теплоизолированной нержавеющей трубы с фланцем (внутренний диаметр трубы 74 мм, длина трубы 70 мм), в которую помещались блочные катализаторы. Для рекуперации тепла

выходные газы направлялись в пространство между внутренней и внешней трубами, а каталитический блок отделялся от трубы двумя экранами (для исключения потери тепла). Внешняя труба с ответным фланцем имела диаметр 84 мм и длину 160 мм и крепилась к фланцу внутренней трубы. Температурный профиль каталитического блока риформера измерялся в четырех точках: на входе в реформер  $T_1$ , на входе в каталитический блок  $T_2$ , между первым и вторым каталитическими блоками  $T_3$  и на выходе из реформера  $T_4$  с помощью термопар К-типа (диаметр 1.5 мм).

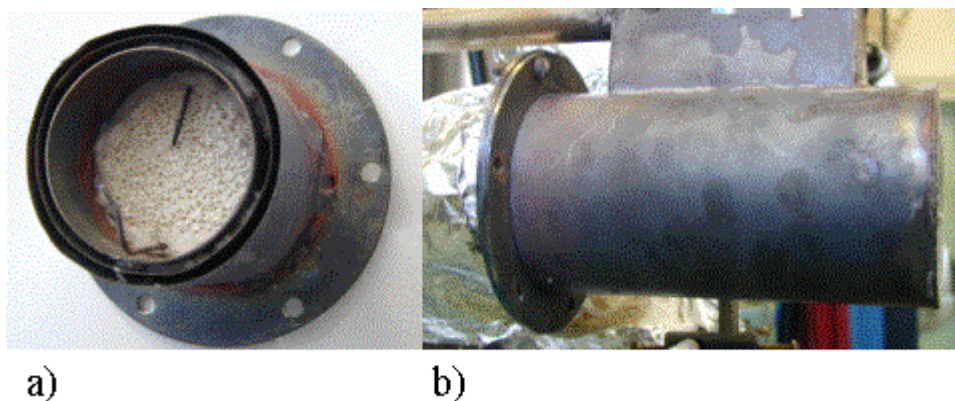


1- входной патрубок в реактор, 2- фланец, 3- наружная труба, 4- экраны, 5- внутренняя труба, 6- каталитические блоки (диаметр 55 мм, длина 55 мм), 7- выходной патрубок, 8- расположение термопар в реакторе.  $T_1$ - входная температура парогаса,  $T_2$ - температура на входе в 1 блок (50 мм от  $T_1$ ),  $T_3$ - температура между 1 и 2 блоками (105 мм от  $T_1$ ),  $T_4$ - температура на выходе из 2 блока (160 мм от  $T_1$ ).

Рисунок 4.3 - Принципиальная схема автотермического риформера дизельного топлива и расположение термопар.

Общий вид реактора автотермической конверсии дизельного топлива или бензина в синтез-газ, разработанного в Институте катализа, представлен на рисунке 4.4.





а) Вид реактора анфас; б) Вид реактора профиль.

Рисунок 4.4 - Общий вид реактора автотермической конверсии дизельного топлива.

Для испарения смеси топлива (многокомпонентная смесь тяжелых углеводородов) и воды был разработан и изготовлен противоточный испаритель с увеличенной поверхностью испарения и регулируемой мощностью нагрева. Он представлял собой трубчатый реактор, в который с помощью форсунки подавалась смесь топлива и воды в необходимых пропорциях. Противотоком к распыленной жидкости подавался горячий газ, полученный при каталитическом окислении воздуха части синтез-газа в отдельном реакторе с неподвижным слоем катализатора. Для обеспечения последующего эффективного испарения смеси топлива и воды в слое катализатора смесь распыливалась с помощью пневматической форсунки. Для анализа выходных газов из автотермического риформера использовался газоанализатор ПЭМ-2М с инфракрасными ячейками на  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$  и газожидкостный хроматограф “Цвет-500” для определения содержания  $\text{H}_2$  и  $\text{N}_2$ . Во всех испытаниях использовалось топливо с ультранизким содержанием серы  $S \leq 0.0021\%$  производства Ачинского нефтеперерабатывающего завода Восточной Нефтяной Компании.

Необходимым условием успешного проведения реакции автотермической конверсии является достижение максимального выхода образованного водорода к исходному количеству углерода в исходном топливе, выраженное в виде мольного отношения  $H_2/C$ . Анализ показывает, что максимально возможный выход водорода на 1 молекулу углерода  $H_2/C$ , для топлива с отношением  $H/C=1.9$ , исходя из стехиометрического уравнения  $CH_{1.9} + H_2O = CO_2 + (2+1.9/2)H_2$ , равен 2,95. Этот выход возможен только при паровой конверсии углеводорода и без учета сдвига реакции. В случае автотермического риформинга выход водорода будет меньше, т.к. кислород воздуха, реагируя с углеродом, уменьшает влияние реакции паровой конверсии.

Так как дизельное топливо и бензин состоят из большого количества углеводородов с различным молекулярным весом и исходным соотношением  $H/C$ , то непосредственный термодинамический анализ равновесного состава конверсии топлива практически невозможен. В качестве приближенного, может быть использован термодинамический анализ равновесного состава паровоздушной конверсии смеси декана  $C_{10}H_{22}$  с бензолом  $C_6H_6$  в мольном отношении 0.64/0.36 соответственно. Такой состав имеет молекулярный вес и отношение  $H/C$  близкое к усредненным значениям параметров дизельного топлива или бензина. Усредненные параметры топлива были определены экспериментально и сравнены с данными завода производителя. Так оказалось, что отношение  $H/C$  в дизельном топливе и бензине равно около 1.9. Используя это отношение, был оценен молекулярный вес группового углерода в топливе, равный  $12+1 \times 1.9=13.9$  г-моль, где 12 – молекулярный вес углерода, 1 - молекулярный вес водорода. Оценка средневесовой молекулы топлива по данным хроматомасспектрографического анализа дало величину молекулярного веса 140 г-моль. Таким образом, среднее количество группового углерода в молекуле топлива равно 10.

По результатам проведенных испытаний наиболее перспективным был признан кобальтовый монолитный металлопористый катализатор на основе фехральной сетки. Используя приведенные выше оценки, был сделан вывод о том, что на данном катализаторе при отношениях  $O_2/C=0.5$  и  $H_2O/C=1.5$  можно получить выход водорода  $H_2/C=1.3$ , что соответствует производительности 18 молей  $H_2$  на один моль топлива. Эта величина превышает результаты, приведенные в [56]. При этом концентрация водорода в продуктах реакции составляет 30% и близка к термодинамически равновесной, выход синтез-газа, достигнутый при испытаниях кобальтового катализатора, составляет 2.88 нл на грамм топлива при отношении  $H_2/CO=3.5$ .

Результаты краткосрочных ресурсных испытаний разработанного катализатора показывают, что в течение 70 часов температура катализатора и состав продуктов конверсии практически не изменялись во времени (рисунок 4.5 и 4.6). Также на катализаторе и в реакторе не было обнаружено следов сажеобразования и изменения массы катализатора.

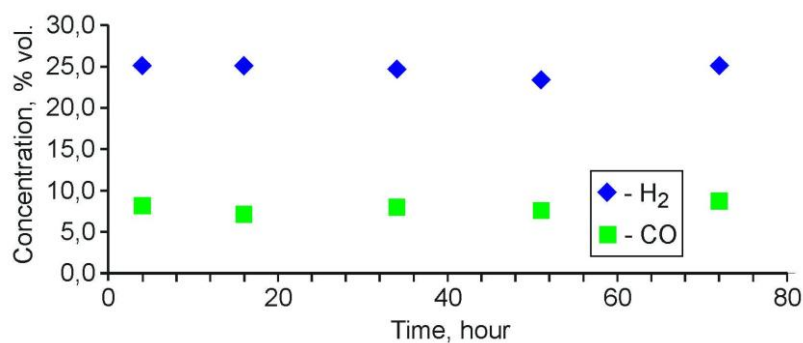


Рисунок 4.5 - Изменение концентраций  $H_2$  и  $CO$  при ресурсных испытаниях кобальтового металлопористого катализатора.

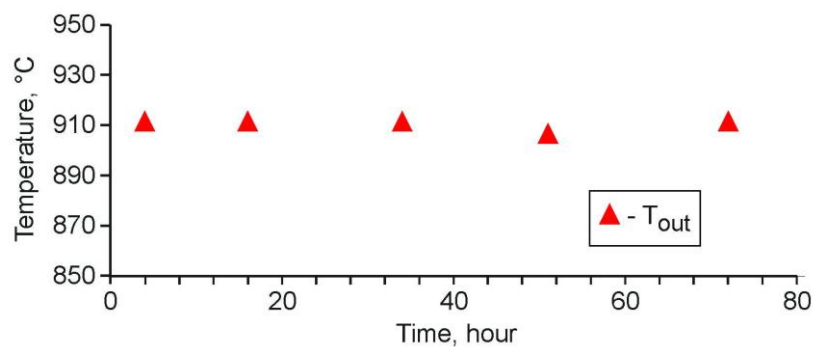


Рисунок 4.6 - Изменение температуры на выходе из слоя катализатора при ресурсных испытаниях кобальтового металлопористого катализатора.

Таким образом, для проведения реакции автотермической конверсии дизельного топлива и бензина в ИК СО РАН было разработано несколько композиций катализаторов на основе армированных сетчатых носителей. Были проведены кратосрочные испытания разработанных катализаторов. Наиболее перспективным катализатором для проведения автотермической конверсии дизельного топлива и бензина был признан кобальтовый монолитный металлопористый катализатор на основе фехралевой сетки.

На основании проведенных экспериментов уточнены оптимальные условия проведения процесса автотермического риформинга дизельного топлива или бензина. Они сводятся к следующему:  $O_2/C = 0.5-0.6$ ,  $H_2O/C = 1.5-1.7$ , время контакта 0.3-0.4 сек, температура смеси на входе в реактор 300-400°C. При этих условиях в продуктах реакции содержатся:  $H_2 = 32\%$ ,  $CH_4 = 1\%$ ,  $CO_2 = 12\%$ ,  $CO = 11\%$ ,  $N_2 = 44\%$  (даны концентрации в сухой смеси); выход синтез-газа составляет 2.88 нл на грамм дизельного топлива, выход водорода - 18 молей на моль топлива.

## 4.2 Использование синтез-газа для восстановления оксидов азота в ОГ ДВС

Ограничение эмиссии  $\text{NO}_x$  до сих пор остается наиболее важной экологической проблемой при использовании дизельных ДВС. Дело в том, что существующие нормы эмиссии  $\text{NO}_x$  соблюдаются исключительно за счет уже достигнутого совершенства конструкции двигателей. Однако предельный уровень эмиссии не может быть значительно уменьшен за счет дальнейших механических доработок или изменения рабочего режима двигателя без существенной потери его эффективности. Поэтому, в связи с неизбежным ужесточением норм эмиссии в будущем, перспективным решением проблемы представляется использование каталитических систем очистки. Наиболее конкурентными из внедряемых в настоящее время в автомобилестроении способами очистки отработанных газов дизельных ДВС являются [57 ]:

- 1) селективное каталитическое восстановление (СКВ) мочевиной;
- 2) адсорбционно-каталитическое восстановление (АКВ) дизельным топливом.

Концепция использования аммиака или мочевины для очистки выхлопных газов транспортных средств от  $\text{NO}_x$  интенсивно развивается уже более 25 лет. Для практических приложений, как правило, используется эвтектический водный раствор мочевины с содержанием 32.5 мол%, который становится стандартом в Европе [58]. Использование водного раствора мочевины обусловлено безопасностью и удобством хранения и транспортировки этого раствора, а также высокой восстановительной эффективностью аммиака, который получается из мочевины на борту автотранспорта.

Технология использования мочевины для селективного восстановления  $\text{NO}_x$  в выхлопных газах дизельных двигателей имеет большой потенциал

применительно к грузовому автотранспорту. В этом случае объем, необходимый для размещения дополнительного бака, каталитического блока, системы дозирования и другого оборудования, не является строгим лимитирующим фактором. Характерный для грузовиков режим работы ДВС при больших нагрузках обеспечивает высокую конверсию и селективность восстановления  $\text{NO}_x$ . Ключевыми проблемами на сегодня остаются снижение температуры замерзания содержащего восстановитель раствора, точный контроль его дозирования в переходных режимах работы двигателя и низкая активность существующих сегодня катализаторов СКВ  $\text{NO}_x$  в низкотемпературной области (до  $200^\circ\text{C}$ ), что негативно сказывается на времени «зажигания» катализатора при старте двигателя из холодного состояния, а также на эффективности работы системы в условиях малой и средней нагрузки двигателя (например, в городском ездовом цикле).

Основное различие между СКВ и АКВ состоит в том, что при проведении первого процесса восстановления  $\text{NO}_x$  проводится в условиях избытка кислорода (т.е. в стандартных условиях эксплуатации дизельного двигателя), а при проведении второго – в периодически создаваемых условиях избытка топлива. Эффективность процесса АКВ может сильно меняться в зависимости от природы и молекулярного веса восстановительного агента: наибольшей восстановительной способностью обладают  $\text{H}_2$  и  $\text{CO}$ , а затем углеводороды.

Технология АКВ является на сегодня единственной достигшей коммерческого успеха на рынке систем для восстановления  $\text{NO}_x$  в выхлопных газах ДВС. Восстановительная среда для эффективной конверсии  $\text{NO}_x$  периодически создается непосредственно в каталитическом блоке очистки за счет удаления из системы свободного кислорода. Как правило, для этого используется дополнительный катализатор (например,  $\text{Pt}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ), на котором после испарения в потоке выхлопных газов окисляется дизельное

топливо. Отметим, что порции впрыснутого в каталитический блок топлива должно хватать для полного удаления как свободного кислорода из выхлопных газов, так и кислорода, запасенного каталитической системой во время работы в условиях избытка воздуха. Кроме того, часть этого топлива должна быть потрачена на создание восстановительной среды для проведения процессов десорбции и восстановления  $\text{NO}_x$ . Значительное повышение температуры системы (обычно около  $150^\circ\text{C}$ ), происходящее при конверсии топлива, ускоряет процессы десорбции и восстановления  $\text{NO}_x$ . Т.к. двигатель постоянно работает в условиях избытка воздуха, то при полной конверсии впрыснутой порции топлива система охлаждается и возвращается в режим адсорбции  $\text{NO}_x$ .

Работа каталитической системы в периодически создаваемых благоприятных условиях восстановительной среды и высокой температуры позволяет добиваться полной конверсии  $\text{NO}_x$  на восстановительной стадии цикла. Поэтому, при более частом повторении этой стадии может быть достигнута близкая к 100% конверсия в среднем по циклу. С другой стороны, от продолжительности интервалов работы в режиме бедной и богатой смеси сильно зависит топливная эффективность системы. Таким образом, при выборе режима работы системы очистки приходится искать компромисс между степенью конверсии и топливной эффективностью. Как правило, впрыск топлива происходит с периодичностью порядка 10 минут, а продолжительность работы каталитической системы в режиме богатой топливной смеси составляет несколько минут [59].

Современные каталитические системы АКВ с использованием дизельного топлива характеризуются высокой активностью в среднетемпературной области, что позволяет добиться приемлемой конверсии  $\text{NO}_x$  при дополнительных затратах топлива на уровне 4-5% от потребления дизеля. Требуемый при этом объем катализатора сравним с

объемом, необходимым для системы очистки на основе СКВ мочевиной. Проблемой является чувствительность катализаторов к уровню содержания серы в топливе. При практическом применении необходима стратегия управления системой очистки в зависимости от режима работы ДВС. Следует отметить, что метод АКВ с использованием дизельного топлива требует применения катализаторов с высоким содержанием металлов платиновой группы, что значительно увеличивает стоимость применения данной технологии.

Согласно литературным данным [60, 61], наилучшие результаты для процесса АКВ могут быть достигнуты при использовании в качестве восстановительного агента водорода или продуктов конверсии дизельного топлива с высоким содержанием СО и H<sub>2</sub>. Ниже более детально рассматриваются два примера реализации процесса АКВ для восстановления NO<sub>x</sub> с применением автотермической конверсии дизельного топлива.

Первый пример – это подход, разработанный Catalytica Energy Systems Inc. Конструкция в виде одного рукава (т.е. без разделения или изменения пути потока во времени) с топливным процессором для конверсии дизельного топлива используется в этом подходе для обеспечения быстрой, низкотемпературной регенерации катализатора АКВ и его периодической десульфуризации (см. рисунок 4.7).

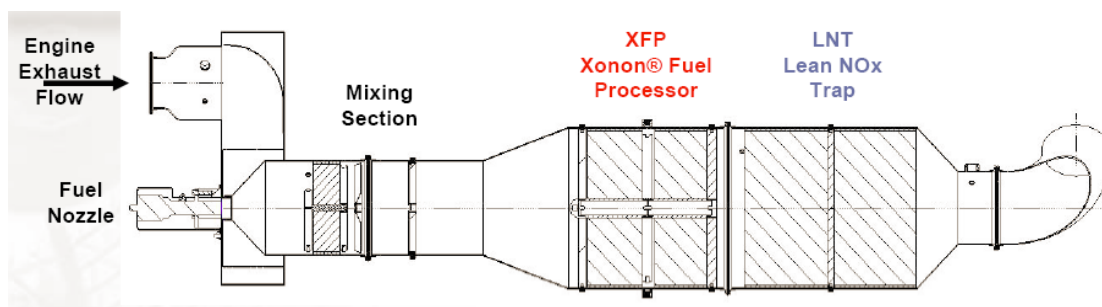


Рисунок 4.7 - Подход, разработанный Catalytica Energy Systems Inc. для применения технологии АКВ в виде каталитической системы с одним рукавом.



В период регенерации катализатора смесь выхлопных газов с впрыснутой порцией дизельного топлива конвертируется в топливном процессоре, производя около 6%  $H_2 + CO$ . Преимуществами такого подхода являются:

1. высокая конверсия  $NO_x$  при отношении  $(H_2 + CO)/NO_x \geq 3$ ;
2. регенерация катализатора АКВ при низкой температуре (от 150°C);
3. требуется небольшой объем катализатора.

Очевидно, что минимальный дополнительный расход топлива достигается в том случае, если максимально сократить издержки на удаление кислорода из выхлопных газов. Это можно сделать за счет управления режимом работы двигателя. В работе [62] показаны тесты, где режим работы двигателя позволял снизить содержание кислорода в выхлопе до 5% при переходе на стадию регенерации катализатора АКВ. В этом случае типичный цикл работы двигателя был следующим: 60 секунд в режиме бедной топливной смеси, затем несколько секунд в режиме обогащенной топливной смеси. Возможность управления режимом работы двигателя позволяет достичь уровня дополнительных расходов топлива менее 3% при 90% конверсии  $NO_x$ . Однако если рассматриваемый метод применяется без управления режимом работы двигателя (т.е. в выхлопе содержится 8-15% кислорода), то дополнительный расход топлива возрастает до 5-8% [63].

Значительно сократить затраты топлива на создание восстановительной среды при регенерации катализатора АКВ можно в том случае, когда применяется система в виде конструкции с двумя содержащими катализатор рукавами либо с одним рукавом, но с возможностью на некоторый период пустить выхлоп в обход системы очистки. В этом случае поток выхлопных газов в период регенерации можно направить по альтернативному пути, а для регенерации катализатора и восстановления  $NO_x$  использовать синтез-газ. При этом топливный процессор должен представлять собой отдельное

устройство, которое позволяет распределять продукты конверсии дизельного топлива между остальными компонентами системы по заданному циклу. В качестве источника кислорода, воды и тепла для конверсии топлива по-прежнему должны использоваться выхлопные газы дизельного двигателя (не полностью, а только их часть), что повысит энергетическую эффективность системы и избавит от необходимости оснащать транспортное средство бортовыми запасами дистиллированной воды. Именно такой подход, предложенный компанией HydrogenSource [64], рассматривается ниже в качестве второго примера реализации процесса АКВ с применением автотермической конверсии дизельного топлива. Предложенный способ (см. рисунок 4.8) характеризуется низкой температурой регенерации катализаторов АКВ, при этом 90% конверсия  $\text{NO}_x$  была достигнута в температурном интервале 150-450°C.

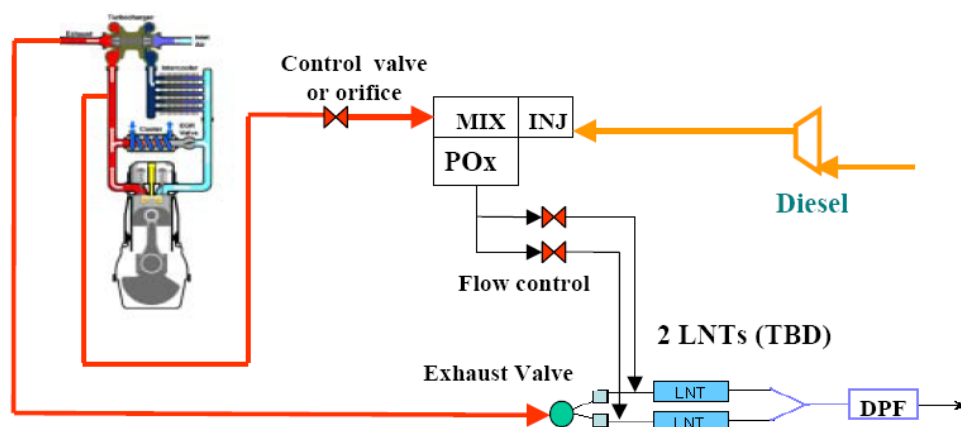


Рисунок 4.8 - Подход, предложенный компанией HydrogenSource для применения технологии АКВ в виде каталитической системы с двумя рукавами.

Ожидаемые преимущества при практической реализации АКВ синтез-газом:

1. быстрое “зажигание” катализатора и возможность температурного контроля;
2. быстрая/низкотемпературная десульфуризация;
3. низкий уровень дополнительных расходов топлива;
4. компактность системы.

Существенно, что во всех перечисленных выше вариантах использования метода АКВ синтез-газом требуются катализаторы с добавками платиноидов.

Проведенные в Институте катализа СО РАН в последние годы лабораторные исследования показали, что эффективным восстановителем оксидов азота может быть синтез-газ, получаемый на борту из части дизельного топлива и подаваемый затем вместе с выхлопными газами двигателя в каталитический блок восстановления (метод СКВ синтез-газом). При этом эффект восстановления значительно увеличивается, если в выхлопных газах содержатся следы непрореагировавшего дизельного топлива. В этом случае дополнительные затраты топлива не превышают 3–4% и для восстановления  $\text{NO}_x$  не требуются катализаторы с добавками платиноидов.

Если синтез-газ использовать для восстановления оксидов азота в режиме АКВ, то дополнительные затраты дизельного топлива на разработанных в ИК СО РАН каталитических системах не превышают 2–2.5%. В настоящее время это – наилучший результат по расходу топлива на восстановление оксидов азота при достижении 90%-ой степени их конверсии в азот.

В таблице 4.1 приведены сравнительные данные рассмотренных вариантов восстановления оксидов азота в выхлопах дизельных двигателей.

Таблица 4.1 - Сравнение различных способов восстановления оксидов азота в выхлопных газах дизельных двигателей.

Вариант восстановления	Необходимость наличия на борту дополнительного восстановителя для NO <sub>x</sub>	Температурная область, в которой достигается конверсия NO <sub>x</sub> >90%	Затраты топлива на детоксикацию NO <sub>x</sub>	Содержание платиноидов в катализаторах
СКВ (мочевина)	Да, мочевина	200 – 500°С	1 – 1.5 % мочевины	Нет
АКВ (дизельное топливо)	Нет	250 – 450°С	4 - 5 % диз. топлива	≥ 2 г/л
СКВ (синтез-газ + дизтопливо) Вариант ИК СО РАН	Нет	200 – 350 °С	3 - 4 % диз. топлива	Нет
АКВ (синтез-газ) Вариант ИК СО РАН	Нет	150 – 450 °С	2 – 2.5 % диз. топлива	Нет

Как отмечено выше, разработанные ИК СО РАН катализаторы для получения синтез-газа и восстановления оксидов азота не содержат платиноидов. Таким образом, очистка выхлопных газов методами АКВ и СКВ за счет использования получаемого на борту синтез-газа может стать недорогим и перспективным решением проблемы сокращения эмиссии оксидов азота автотранспортом с ДВС.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам работ можно сделать следующие выводы и рекомендации.

1. По полученным экспериментальным результатам определены зависимости влияния добавки водорода на мощностные и экономические показатели двигателя, а также установлено влияние водорода на отдельные токсичные компоненты. В частности получено:

- добавка водорода в принятом диапазоне изменения его расхода, обеспечиваемый системой подачи водорода, не ухудшает мощностные показатели двигателя;
- на исследованных режимах работы двигателя при принятых условиях добавка водорода не оказывает практически значимого влияния на эффективный КПД двигателя;
- анализ результатов экспериментов позволил установить, что расход дизельного топлива подчиняется следующей зависимости:

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

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

$G_m$  – расход топлива без добавки водорода в ТВС, кг/ч;

$G_H$  – расход водорода, кг/ч;

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

Предложенная зависимость позволяет проводить оценку расхода топлива при использовании добавки водорода с погрешностью 5 %;

- в принятом диапазоне изменения расхода водорода на исследованных режимах добавка водорода оказывает малое влияние на выбросы NOx и CO;

- применение добавки водорода существенно снижает выбросы СН
    - на отдельных режимах работы двигателя до 40 %;
  - результаты испытаний не позволили сделать однозначный вывод о влиянии добавки водорода на выбросы твердых частиц и дымность ОГ, так испытания по циклу ESC зафиксировано уменьшение выбросов твердых частиц (Рт) примерно на 30%, в то время как, оценка выбросов при добавке водорода на отдельных режимах показывает значительное увеличение Рт.
2. На основе результатов проведенных испытаний можно сформулировать следующие рекомендации:
- для получения значимых результатов влияния водорода на мощностные, экономические и экологические показатели двигателя на высоких скоростных режимах и режимах высокой нагрузки расход водорода необходимо увеличить расход водорода до величин примерно 1-2 кг/ч;
  - для установления влияния добавки водорода в ТВС на дымность ОГ и выбросы твердых частиц необходимо проведение дополнительных исследований;
3. Предложен комплекс мероприятий позволяющий обеспечить существующие и перспективные требования по токсичности, в частности:
- - предложено заменить «чистый» водород на синтез-газ получаемый из дизельного топлива методом каталитической конверсии;
  - - синтез-газ для снижения параметров токсичности по СО, СН и Рт предлагается подавать во впускной канал двигателя в объеме до 20 % от расхода топлива и режима работы двигателя;

– - для уменьшения выбросов NOx предлагается использовать технологию АКВ.

4. Предложенный метод за счет использования получаемого на борту синтез-газа может стать недорогим и перспективным решением проблемы сокращения эмиссии токсичных ДВС с гетерогенным способом формирования ТВС

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Концерн BMW Group. Энергоноситель: Водород в качестве неограниченно доступной альтернативы ископаемым видам топлива, перспектива производства. [Электронный ресурс] / Концерн BMW Group : Автомобили BMW в России и в мире. Обзоры новинок, технологий, моделей.-2006.- Режим доступа:  
<http://bmwnews.ru/news38559.html>
2. JoAnn Milliken. Roadmap on Manufacturing R&D for the Hydrogen Economy: офиц. текст. - Washington, D.C., 2005
3. U.S. Department of energy. Hydrogen Manufacturing. [Электронный ресурс] / U.S. Department of energy.: Hydrogen and Fuel Cells Programm.-2006.- Режим доступа:  
<http://www.hydrogen.energy.gov/manufacturing.html>
4. The World Bank. Motor vehicles (per 1000 people). Databank. [Электронный ресурс] / The World Bank. – 2012.- Режим доступа:  
<http://data.worldbank.org/indicator/IS.VEN.NVEN.P3>
5. Экологическое объединение «Беллона» . Компания Shell открыла первую в США станцию по заправке автомобилей водородом. [Электронный ресурс] / Экологическое объединение «Беллона».-2004.- Режим доступа:  
[http://bellona.ru/russian\\_import\\_area/energy/renewable/36065](http://bellona.ru/russian_import_area/energy/renewable/36065)
6. G. Kiesgen, E. Berger, H. Rottengruber, Hydrogen internal combustion engines for vehicle generations of the future. AutoTechnology, V. 6, p. 40-43, 2006
7. А.И. Мищенко «Применение водорода для автомобильных двигателей». Киев. Наукова Думка, 1984
8. Мирзоев Г.К., Сорокин А.И. «Концепция ОАО «АВТОВАЗ» по переходу к использованию альтернативных топлив и водорода». Доклад на



международном форуме «Водородные технологии для производства энергии», Москва, Февраль 2006

9. Don Karner, James Francfort. Advanced Vehicle Testing Activity high-percentage HYDROGEN / CNG blend on FORD F -150. - operating summary. U.S. Department of Energy/ Idaho, 2003.

10. Don Karner, James Francfort. Advanced Vehicle Testing Activity low-percentage HYDROGEN / CNG blend on FORD F -150. - operating summary. U.S. Department of Energy, Idaho, 2003.

11. Золотницкий В.А. Новые газовые системы автомобилей. – М.: «Издательский дом Третий Рим», 2003.

12. Лютко В. Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания / В. Лютко, В.Н. Луканин, А.С. Хачиян. – М.: МАДИ, 2000 – 2 т.

13. The Clean Fuels Report, J.E. Sinor Consultants Inc., Niwot, Colorado, June 1992.

14. Звонов В.А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания / В.А. Звонов. Изд. 2-е – перераб. – М.: Машиностроение. – 1981.

15. Кульчицкий А.Р. Токсичность автомобильных и тракторных двигателей: учеб. пособие / А.Р. Кульчицкий; Владимирский гос. университет. Владимир, 2000.

16. Образование и разложение загрязняющих веществ в пламени; перевод с англ. Ю.Ф. Дитикина. – Машиностроение. – 1981.

17. Основы горения углеводородных топлив; перевод с англ. под ред. Л.И. Хитрина и А.И. Попова. – Изд. иностр. литературы. – 1960.

18. Хитрин Л.И. Физика горения и взрыва / Л.И. Хитрин; М.: - 1955.

19. Heywood J.B.: Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw-Hill Book Company, 1994.

20. Синтезгаз. Свойства Газа Брауна. [Электронный ресурс] / Синтезгаз. Альтернативная энергия.-2009.- Режим доступа:  
[http://sintezgaz.org.ua/1\\_articles/122/svoistva-gaza-brauna](http://sintezgaz.org.ua/1_articles/122/svoistva-gaza-brauna)
21. Синтезгаз. Что такое газ Брауна. [Электронный ресурс] / Синтезгаз. Альтернативная энергия.-2009.- Режим доступа:  
[http://sintezgaz.org.ua/1\\_articles/127/что-такое-газ-brauna](http://sintezgaz.org.ua/1_articles/127/что-такое-газ-brauna)
22. Johz F. Cassidy. Emissions and total energy consumption of a multicylinder piston engine running on gasoline and a hydrogen-gasoline mixture. Lewis Research Center, Cleveland, Ohio, 1977.
23. Mike Allen. Water-Powered Cars: Hydrogen Electrolyzer Mod Can't Up MPGs. Popular Mechanics, August 7, 2008
24. Ф.В. Смаль, Е.Е. Арсенов, Перспективные топлива для автомобилей. М., «Транспорт», 1979
25. N.N. Mustafi, Y.C. Miraglia, R.R. Raine, P.K. Bansal, S.T. Elder, Spark-ignition engine performance with 'Powergas' fuel (mixture of CO/H<sub>2</sub>): A comparison with gasoline and natural gas. Fuel, V. 85, p. 1605-1612, 2006
26. D. Andreatta, R.W. Dibble, An experimental study of air-reformed natural gas in spark-ignited engines. SAE Technical Paper Series No. 960852, 1996
27. C. Sogaard, J. Schramm, T.K. Jensen, Reduction of UHC-emissions from natural gas fired SI-engine – production and application of steam reforming natural gas. SAE Technical Paper Series No. 2000-01-2823, 2000
28. J.E. Kirwan, A.A. Quader, M.J. Grieve, Advanced engine management using on-board gasoline partial oxidation reforming for meeting super-ULEV (SULEV) emissions standards. SAE Technical Paper Series No. 1999-01-2927, 1999
29. M.A.S. Al-Baghdadi, Hydrogen-ethanol blending as an alternative fuel of spark ignition engines. Renewable Energy, V. 28, p. 1471-1478, 2003

30. 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.
31. Колчин А.И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей: учебное пособие для вузов / А.И. Колчин, В.П. Демидов. Изд. 2-е - перераб. и доп. – М.: Высш. Школа. – 1980.
32. Wentworth J.T. SAE. Combust., Sci. Technol., 4, 970100. – 1970.
33. Simon D.M. Fourth Symposium (International) on combustion / Simon D.M., Belles F.E., Spakowski A.E.; p. 126-138, Baltimore. - 1953. См. 4-ый симпозиум (международный) по вопросам горения и детонационных волн: оборонгаз с. 100. – 1958.
34. Яблоков В.А. Теория горения и взрывов: учеб. пособ. - Н.Новгород, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 2007 г.
35. ГОСТ 8.207-76. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений.
36. Новицкий П.В. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф; Л.: Энергоавтомиздат, Ленинград. отделение. – 1985
37. Афанасьев А.Н., Беляков Г.П., Бортников Л.Н., Олехнович В.А., Павлов Д.А., Русаков М.М. Использование водорода для улучшения показателей автомобильных ДВС с искровым зажиганием/ Труды Международного симпозиума по водородной энергетике. - М.: Издательство МЭИ, 2005.
38. 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.

39. Воинов А.И. Процессы сгорания в быстроходных поршневых двигателях / А.И. Воинов; М.: Машиностроение. – 1977.

40. Левтеров А.М. ИПМАШ НАН УКРАИНЫ – ДИЗЕЛЕСТРОЕНИЮ. [Электронный ресурс] / Национальная библиотека Украины имени В.И. Вернадского.: -2011.- Режим доступа: [http://archive.nbuv.gov.ua/portal/natural/Dvs/2011\\_1/16.PDF](http://archive.nbuv.gov.ua/portal/natural/Dvs/2011_1/16.PDF)

41. Пат. 2446092 Российская Федерация, МПК С01В3/38, В01J8/04. Бортовой генератор для получения синтез-газа [Текст] / Киреенков Виктор Викторович, Кузин Николай Алексеевич, Кириллов Валерий Александрович, Ермаков Юрий Павлович; Патентообладатель Учреждение Российской Академии наук Институт катализа им. Г.К. Борескова Сибирского отделения РАН - № 2010125991 /05; заявл. 25.06.2010; опубл. 27.12.2011.

42. В.А.Звонов. Токсичность двигателей внутреннего сгорания.- 2-е изд., перераб.- М.: Машиностроение, 1981. – 160 с., ил.

43. Теснер П.А. Образование углерода из углеводородов газовой фазы. М.: Химия, 1972. 136с.

44. Брозе Д. Д. Сгорание в поршневых двигателях. М.: Машиностроение, 1969. 247с.

45. Варшавский И. Л., Мачульский Ф. Ф. Токсичность дизельной сажи и измерение сажесодержания дизельного выхлопа.- Тр. ЛАНЭ. М.: Знание, 1969. с. 120 - 15

46. Морозов, К. А. Токсичность автомобильных двигателей / К. А. Морозов. – М.: Легион-Автодата, 2000. – 80 с.

47. Direct studies of some elementary steps for the formation and destruction of nitric oxide in the H–N–O system / M. Gehring [et al.] // 14th Symp. (Int.) Comb.The Combustion Institute. – Pittsburgh, 1973. – P. 99.

48. T. Krause, J.M. Mawdsley, C. Rossignol, J. Kopasz, D. Applegate, M. Ferrandon, J.D. Carter, M. Krumpelt. "Catalysts for autothermal reforming". In ANL FY Progress Report "Hydrogen, Fuel Cells, and Infrastructure Technologies" 2002.
49. J.M. Mawdsley, M. Ferrandon, C. Rossignol, J. Ralph, L. Miller, J. Kopasz, T. Krause. "Catalysts for autothermal reforming". In ANL FY Progress Report "Hydrogen, Fuel Cells, and Infrastructure Technologies" 2003.
50. D. A. Berry, D. Shekhawat, T. H. Gardner. "Development of reaction kinetics for diesel-based fuel cell reformers". In DOE National Energy Technology Laboratory FY Report 2003 "Hydrogen, Fuel Cells, and Infrastructure Technologies".
51. C. Pereira, J-M Bae, S. Ahmed, M. Krumpelt. "Liquid fuel reformer development: Autothermal reforming of diesel fuel" Report under Contract W-31-109-ENG-38, 2000.
52. J. Pasel, J. Meissner, Z. Pors, C. Palm, P. Cremer, R. Peters, and D. Stolten. "Hydrogen Production via Autothermal Reforming of Diesel Fuel. Fuel Cells" 4 (2004) 3 225-230.
53. J.P. Kopasz, D.J. Liu, S. Lottes, R. Ahluwalia, V. Novick, S. Ahmed. "Reforming of diesel fuel for transportation applications". In ANL FY Progress Report "Hydrogen, Fuel Cells, and Infrastructure Technologies" 2003.
54. D. A. Berry, D. Shekhawat, T. H. Gardner, W. Rogers "Fuel Processing of diesel fuel for auxiliary power units". In DOE National Energy Technology Laboratory FYReport 2002 "Hydrogen, Fuel Cells, and Infrastructure Technologies".
55. T. Krause, M. Ferrandon, J. Mawdsley, J. Ralph. "Catalysts for autothermal reforming". In ANL FY Progress Report "DOE Hydrogen Program" 2004.

56. T. Krause, M. Ferrandon, J. Mawdsley, J. Ralph. "Catalysts for autothermal reforming". In ANL FY Progress Report "DOE Hydrogen Program" 2004
57. E. Jobson, Future challenges in automotive emission control. Topics in Catalysis, V. 28, p. 191-199, 2004
58. ACEA Statement on the Adoption of SCR Technology to Reduce Emissions Levels of Heavy-Duty Vehicles 30/06/2003
59. W.S. Epling, L.E. Campbell, A. Yezerets, N.W. Currier and J.E. Parks II. Catal. Rev., V. 46, p. 163, 2004
60. Y. Kong, S. Crane, P. Patel, B. Taylor, NOx trap regeneration with an on-board hydrogen generation device. SAE Technical Paper Series No. 2004-01-0582, 2004
61. M.C. Wu, T. Han, G.B. Fisher, Experimental evaluation of reformate-assisted diesel NOx trap desulfation. SAE Technical Paper Series No. 2005-01-3878, 2005
62. R. Dalla Betta, D. Sheridan and J. Cizeron. Report of Catalytica Energy Systems Inc. on DEER Conference, Coronado, California, 2004
63. D. Yee, B. Adair, A. Boleda, B. Berry, T. Caron, J. Cizeron, T. Kinney, K. Lundberg and R. Dalla Betta. Report of Catalytica Energy Systems Inc. on DEER Conference, Chicago, Illinois, 2005
64. Report of HydrogenSource on DEER Conference, Newport RI, 2003

# ПРИЛОЖЕНИЕ А

## ПЕРВИЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Дата: 26.06.2007

Условная внешняя скоростная характеристика без добавки водорода

п, об/мин	Ре, условн.	Ne, л.с.	Me, Нм	Твод., С	Тм, С	Рм, кгс/см2	Ттопл.,С	Твозд, С	Рост.г., мм.вод.ст	Тп, С	Тл,С	Gm, кг/ч	Ge, кг/ч	Kx, %	CO, ppm	CH, ppm	NOx, ppm	CO2, %	Pt, r/кВтч	ge, r/л.с.ч	α (без водорода)	α (с водородом)	Q, МДж/с без учета водорода	Q', МДж/с с учетом водорода	КПД эффективное
1900	989	249.0919	963.0882	79	92	4	37	26	60	448	445	50.08		1.8						201.0503			2203.52	2203.52	0.313041413
1700	1031	232.3364	1003.988	80	97	3.4	37	26	48	442	442	42.82		1.9						184.3017			1884.08	1884.08	0.341489336
1500	1075	213.7516	1046.835	80	96	3	37	26	38	455	455	37.32		1.9						174.5951			1642.08	1642.08	0.360474303
1300	1092	188.181	1063.39	79	94	2.6	36	27	27	476	476	31.43								167.0201			1382.92	1382.92	0.376823373
1100	1026	149.6063	999.1188	79	93	2.1	35	27	20	486	486	24.87								186.2363			1094.28	1094.28	0.37859899
900	985	117.5137	959.183	80	92	1.8	34	28	15	483	476	18.59								158.1943			817.96	817.96	0.387846529

Регулировочная характеристика по водороду

Гн, кг/ч	Режим	п, об/мин	Ne, условн.	Ne, л.с.	Me, Нм	Твод., С	Тм, С	Рм, кгс/см2	Ттопл.,С	Твозд, С	Рост.г., мм.вод.ст	Тп, С	Тл,С	Gm, кг/ч	Ge, кг/ч	Kx, %	CO, ppm	CH, ppm	NOx, ppm	CO2, %	Pt, r/кВтч	ge, r/л.с.ч	α (без водорода)	α (с водородом)	Q, МДж/с без учета водорода	Q', МДж/с с учетом водорода	КПД эффективное
0	A-100	1180	1003	156.8891	976.7214	75	82	2.2	31	30	24	458	463	26.78								0.061	170.6939		1151.54	1151.54	0.368713119
0	A-25	1180	268	41.92051	260.9784	72	83	2.2	33	27	12	271	262	8.7								0.102	207.5356		374.1	374.1	0.303259051
0	C-100	1730	972	222.9062	946.5336	76	88	3.6	32	25	48	412	413	41.22								0.059	184.9208		1772.46	1772.46	0.340345963
0	C-25	1730	286	65.58762	278.5068	75	85	4	33	24	23	290	286	17.33								0.265	264.2267		745.19	745.19	0.23819344

Гн, кг/ч	Режим	п, об/мин	Ne, условн.	Ne, л.с.	Me, Нм	Твод., С	Тм, С	Рм, кгс/см2	Ттопл.,С	Твозд, С	Рост.г., мм.вод.ст	Тп, С	Тл,С	Gm, кг/ч	Ge, кг/ч	Kx, %	CO, ppm	CH, ppm	NOx, ppm	CO2, %	Pt, r/кВтч	ge, r/л.с.ч	α (без водорода)	α (с водородом)	Q, МДж/с без учета водорода	Q', МДж/с с учетом водорода	КПД эффективное
0.19	A-100	1180	1001	156.5762	974.7738	75	87	2.3	34	30	22	467	482	26.84								0.067	170.1408		1172.16	1184.96	0.369193588
0.19	A-25	1180	269	42.07693	261.9522	60	76	2.8	33	33	2	239	232	9.41								0.176	223.638		414.04	436.84	0.279882608
0.19	C-100	1730	977	224.0528	951.4028	77	93	3.3	38	34	45	438	448	41.53								0.06	185.3581		1827.32	1850.12	0.339120095
0.19	C-25	1730	285	65.35829	277.533	63	80	4.1	34	34	10	285	292	15.76								0.277	241.1324		693.44	716.24	0.260150925

Гн, кг/ч	Режим	п, об/мин	Ne, условн.	Ne, л.с.	Me, Нм	Твод., С	Тм, С	Рм, кгс/см2	Ттопл.,С	Твозд, С	Рост.г., мм.вод.ст	Тп, С	Тл,С	Gm, кг/ч	Ge, кг/ч	Kx, %	CO, ppm	CH, ppm	NOx, ppm	CO2, %	Pt, r/кВтч	ge, r/л.с.ч	α (без водорода)	α (с водородом)	Q, МДж/с без учета водорода	Q', МДж/с с учетом водорода	КПД эффективное	
0.19	A-25	1180	268	41.8	256	61	75	2.8	31	34	3	239	236	9.28								0.22	200.096	3.65	3.280851	408.32	431.12	0.281913897
0.42	A-25	1180	265	43.4	251	59	74	2.9	30	32	3	239	263	8.7								0.2	200.4608	3.88	3.270493	382.8	433.2	0.30988195
0	A-25	1180	330	43.2	258	73	89	2.2	35	33	6	315	315	9.76								0.6	225.9259	3.37	3.280064	429.44	429.44	0.278573885

Гн, кг/ч	Режим	п, об/мин	Ne, условн.	Ne, л.с.	Me, Нм	Твод., С	Тм, С	Рм, кгс/см2	Ттопл.,С	Твозд, С	Рост.г., мм.вод.ст	Тп, С	Тл,С	Gt, кг/ч	Ge, кг/ч	Kx, %	CO, ppm	CH, ppm	NOx, ppm	CO2, %	Pt, r/кВтч	ge, r/л.с.ч	α (без водорода)	α (с водородом)	Q, МДж/с без учета водорода	Q', МДж/с с учетом водорода	КПД эффективное
0	XX	600	0	0	0	53	65	1.7	29	32	2	113	113	1.59									11.8	11.48115	69.96	69.96	
0.42	XX	600	0	0	0	53	65	1.8	29	31	2	109	95	1.56									12.2	7.095591	68.64	119.04	

Дата: 27.06.2007

Регулировочная характеристика по углу опережения впрыска топлива

УОВТ 2

Гн, кг/ч	Режим	п, об/мин	Ne, условн.	Ne, л.с.	Me, Нм	Твод., С	Тм, С	Рм, кгс/см2	Ттопл.,С	Твозд, С	Рост.г., мм.вод.ст	Тп, С	Тл,С	Gm, кг/ч	Ge, кг/ч	Kx, %	CO, ppm	CH, ppm	NOx, ppm	CO2, %	Pt, r/кВтч	ge, r/л.с.ч	α (без водорода)	α (с водородом)	Q, МДж/с без учета водорода	Q', МДж/с с учетом водорода	КПД эффективное
0	A-100	1180	1001	156.5762	974.7738	76	86	2.7	32	28		436	440	27.26								0.07	174.1005		1199.44	1199.44	0.381498464
0.42	A-100	1180	999	156.2634	972.8262	79	92	2.2	34	28		463	502	25.56								0.073	163.57		1124.64	1175.04	0.383054841
0	A-25	1180	265	41.45125	258.057	75	81	2.6	32	27		279	273	8.54								0.7	206.0251		375.76	375.76	0.305482428
0.42	A-25	1180	269	42.07693	261.9522	67	75	2.8	31	28		223	260	7.8								0.3	914	347	360	393.6	0.334598918
0	XX	660	0	0	0	56	70	1.7	35	34		104	88	1.7									11.4	10.93565	74.8	74.8	
0.19	XX	660	0	0	0	56	70	1.7	35	34		104	88	1.62									11.56	8.712535	71.28	94.08	

УОВТ 0

Гн, кг/ч	Режим	п, об/мин	Ne, условн.	Ne, л.с.	Me, Нм	Твод., С	Тм, С	Рм, кгс/см2	Ттопл.,С	Твозд, С	Рост.г., мм.вод.ст	Тп, С	Тл,С	Gm, кг/ч	Ge, кг/ч	Kx, %	CO, ppm	CH, ppm	NOx, ppm	CO2, %	Pt, r/кВтч	ge, r/л.с.ч	α (без водорода)	α (с водородом)	Q, МДж/с без учета водорода	Q', МДж/с с учетом водорода	КПД эффективное	
0	XX	660	0	0	0	55	63	1.8	31	31		185	180	1.99									8.9	8.566322	87.56	87.56		
0.19	XX	660	0	0	0	50	61	1.8	31	31		130	123	2.12										6.509655	93.28	116.08		
0.42	XX	660	0	0	0	52	62	1.8	31	31		147	174	1.54										11.3	6.643272	67.76	118.16	

УОВТ 4

Гн, кг/ч	Режим	п, об/мин	Ne, условн.	Ne, л.с.	Me, Нм	Твод., С	Тм, С	Рм, кгс/см2	Ттопл.,С	Твозд, С	Рост.г., мм.вод.ст	Тп, С	Тл,С	Gm, кг/ч	Ge, кг/ч	Kx, %	CO, ppm	CH, ppm	NOx, ppm	CO2, %	Pt, r/кВтч	ge, r/л.с.ч	α (без водорода)	α (с водородом)	Q, МДж/с без учета водорода	Q', МДж/с с учетом водорода	КПД эффективное		
0	XX	667	0	0	0	59	58	1.8	31	32		185	180	1.66										10.7	10.35013	73.04	73.04		
0.42	XX	667	0	0	0	51	60	1.8	31	32		130	123	1.01											17.4	8.66345	44.44	94.84	
0.19	XX	667	0	0	0	51	61	1.8	31	32		147	174	1.42											12.5	9.18111	62.48	85.28	
0	A-100	1180	1000	156.4198	973.8	68	76	2.7	32	32		446	452	26.98											172.4845	1187.12	1187.12	0.364885231	
0.42	A-100	1180	1005	157.2019	978.869	76	89	2.2	35	33		458	493	25.64											163.1023	1178.56	1178.56	0.384158461	

# ПРИЛОЖЕНИЕ А - ПРОДОЛЖЕНИЕ

Испытательный цикл ESC без добавки водорода

№	Режим	п. об/мин	Re, условн.	Ne, л.с.	Me, Нм	Твод., С	Тм, С	Рм, кгс/см2	Ттопл.,С	Твезд, С	Рост.г., мм.вод.ст	Тп, С	Тл,С	Gт, кг/ч	Ge, кг/ч	Kx, %	CO, ppm	CH, ppm	NOx, ppm	CO2, %	Pт, г/кВтч	ge, г/л.с.ч	α (без водорода)	α (с водорода м)	Q, МДж/с без учета водорода	Q', МДж/с с учетом водорода	КПД эффективное			
1	XX	600	0	0	0	72	82	1.4	37	31	1	263	262	1.53		0.3								67.32	187.32					
2	A-100	1180	1236	193.3349	1203.617	70	81	2.4	33	32	30	472	480	33.52	748.26	2	70	200	660			173.3779	1.49817398	1.456232	1474.86	1774.88	0.357192848			
3	B-50	1450	636	122.2461	619.3368	73	88	2.8	38	35	14	368	392	21.83	758.91	1	136	179	450			176.9382	2.35478454	2.254152	951.79	1311.72	0.342736352			
4	B-75	1450	958	184.1379	932.9004	77	91	2.7	37	33	32	439	445	32.14	925.64	1.2	49	190	490			174.5431	1.93292061	1.876534	1414.16	1894.16	0.348744616			
5	A-50	1180	622	97.29312	605.7036	77	92	2.1	37	33	11	406	410	16.91	548.02	1.2	100	185	560			173.8047	2.17503641	2.057565	744.04	1344.04	0.33501674			
6	A-75	1180	928	145.1576	903.6864	77	91	2.1	36	33	19	445	450	24.94	639.57	2	60	195	612			171.8133	1.72109708	1.656956	1097.36	1817.36	0.343756286			
7	A-25	1180	330	51.61854	321.354	73	89	2.2	35	33	6	315	315	9.76	483.96	0.6	530	270	435			189.0794	3.32585093	3.026488	429.44	1269.44	0.278403792			
8	B-100	1450	1230	236.4193	1197.774	77	90	2.8	35	33	39	464	473	41.25	1063.49	1.9	56	166	540			174.4782	1.7303071	1.690736	181.16	2775	0.342595241			
9	B-25	1450	336	64.58282	327.1968	74	91	2.7	37	34	4	336	339	12.99	639.26	0.5	679	350	340			201.1371	3.30279875	3.074311	571.56	1651.56	0.263177266			
10	C-100	1730	1162	266.4784	1131.556	73	88	3.3	36	33	62	450	457	50.69	1463.72	2	65	148	410			190.2218	1.9379807	1.90176	2230.36	3430.36	0.313968981			
11	C-25	1730	336	77.05399	327.1968	73	92	3.3	39	34	13	336	334	17.08	840.39	0.5	708	390	260			221.6628	3.30222561	3.125556	751.52	2071.52	0.241511544			
12	C-75	1730	760	174.2888	740.088	74	90	3.3	38	33	30	400	399	31.41	1101.76	1	90	140	350			180.2181	2.35414276	2.283942	1362.04	2822.04	0.316273407			
13	C-50	1730	619	141.9536	602.7822	74	91	3.3	38	33	19	378	380	28.62	999.39	0.8	165	157	350			187.526	2.51965268	2.43147	1171.28	2731.28	0.296171388			
																						CO, г/кВт ч	CH, г/кВт ч	NOx, г/кВт ч	Pт, г/кВтч					
																						1.48	0.84	6	0.074					

Дата: 28.06.07.

Условная внешняя скоростная характеристика без добавки водорода

п. об/мин	Re, условн.	Ne, л.с.	Me, Нм	Твод., С	Тм, С	Рм, кгс/см2	Ттопл.,С	Твезд, С	Рост.г., мм.вод.ст	Тп, С	Тл,С	Gт, кг/ч	Ge, кг/ч	Kx, %	CO, ppm	CH, ppm	NOx, ppm	CO2, %	Pт, г/кВтч	ge, г/л.с.ч	α (без водорода)	α (с водорода м)	Q, МДж/с без учета водорода	Q', МДж/с с учетом водорода	КПД эффективное		
1900	1123	282.8415	1093.577	80	85	3.4	40	29	75	479	486	56.68	1688.68	2								199.621501	1.999545	2459.32	2453.32	0.314085173	
1700	1287	290.0282	1253.281	81	100	3	41	29	66	489	495	55.16	1467.18	2.5								190.1897	1.77324148	1.785142	2427.04	2427.04	0.330917271
1500	1206	239.7995	1174.403	79	97	2.7	39	30	50	470	487	44.46	1187.6	2.2								185.4049	1.78077673	1.792728	1956.24	1956.24	0.339457444
1300	1310	225.7483	1275.678	79	96	2.3	38	31	35	501	511	37.83	911.43	3								167.576	1.60618557	1.616965	1664.52	1664.52	0.375573144
1100	1271	185.331	1237.7	79	95	2	38	31	26	524	530	30.36	660.79	3.1								163.815	1.4510101	1.460748	1335.84	1335.84	0.384195869
900	1205	143.7604	1173.429	78	94	1.6	37	31	19	540	547	24.15	475.88	10								167.9878	1.3136784	1.322495	1062.6	1062.6	0.374652508

Условная внешняя скоростная характеристика с добавкой водорода 0.42 кг/ч

п. об/мин	Re, условн.	Ne, л.с.	Me, Нм	Твод., С	Тм, С	Рм, кгс/см2	Ттопл.,С	Твезд, С	Рост.г., мм.вод.ст	Тп, С	Тл,С	Gт, кг/ч	Ge, кг/ч	Kx, %	CO, ppm	CH, ppm	NOx, ppm	CO2, %	Pт, г/кВтч	ge, г/л.с.ч	α (без водорода)	α (с водорода м)	Q, МДж/с без учета водорода	Q', МДж/с с учетом водорода	КПД эффективное		
1900	1139	286.8713	1109.158	79	88	3	43	31	78	465	490	57.28	1692.18	1.6								199.6714	1.96948324	1.982701	2520.32	2520.32	0.315203142
1700	1283	289.1248	1249.385	80	95	2.9	42	32	68	483	508	54.3	1504.09	2								187.8082	1.84664211	1.859036	2389.2	2389.2	0.335113537
1500	1295	257.4962	1261.071	80	98	2.6	40	32	51	480	503	44.03	1188.04	2.2								170.9928	1.79883413	1.810907	1937.32	1937.32	0.368068427
1300	1309	225.5759	1274.704	79	97	2.3	39	32	39	495	532	36.87	900.14	3								163.4483	1.62759244	1.638516	1622.28	1622.28	0.385057941
1100	1277	186.2059	1243.543	79	96	2	38	33	28	516	554	29.82	658.3	3.5								160.1453	1.4717192	1.481597	1312.08	1312.08	0.392999852
900	1205	143.7604	1173.429	78	94	1.6	38	33	19	531	584	23.3	474.31	13								162.0752	1.35711016	1.366218	1025.2	1025.2	0.388320089

Испытательный цикл ESC с добавкой водорода 0.42 кг/ч

№	Режим	п. об/мин	Re, условн.	Ne, л.с.	Me, Нм	Твод., С	Тм, С	Рм, кгс/см2	Ттопл.,С	Твезд, С	Рост.г., мм.вод.ст	Тп, С	Тл,С	Gт, кг/ч	Ge, кг/ч	Kx, %	CO, ppm	CH, ppm	NOx, ppm	CO2, %	Pт, г/кВтч	ge, г/л.с.ч	α (без водорода)	α (с водорода м)	Q, МДж/с без учета водорода	Q', МДж/с с учетом водорода	КПД эффективное			
1	XX	600	0	0	0	72	85	1.3	35	30	5	223	230	1.55		0.4	106	197	101	0.84				68.2	188.2					
2	A-100	1180	1232	192.7092	1199.722	77	88	2.4	34	30	32	478	520	32	737.76	1.8	77	129	656	9.7			166.0533	1.537	1.502	1408	1648	0.372664991		
3	B-50	1450	631	121.285	614.4678	76	89	2.8	35	30	22	374	408	20.27	753.48	1	122	105	445	5.8			167.127	2.4779806	2.381198	891.88	1251.88	0.361917558		
4	B-75	1450	928	178.3716	903.8864	76	100	2.8	35	30	34	414	451	29.96	903.81	1.3	52	98	467	7.17			167.964	2.0111482	1.96144	1318.24	1798.24	0.361541272		
5	A-50	1180	610	95.41609	594.018	77	92	2.2	35	31	17	377	417	15.34	533.43	1.1	96	92	586	6.1			160.7695	2.31825293	2.195628	674.96	1274.96	0.359546255		
6	A-75	1180	918	143.5934	893.9484	77	91	2.2	34	31	23	424	470	23.16	619.81	2.1	67	105	604	8.11			161.2888	1.78413932	1.724238	1019.04	1739.04	0.364462555		
7	A-25	1180	330	51.61854	321.354	75	89	2.2	34	31	18	288	321	8.8	474.6	0.7	572	219	383	3.58			170.4814	3.59545455	3.261744	387.2	1227.2	0.303360873		
8	B-100	1450	1235	237.3803	1202.643	78	91	2.7	33	31	47	450	490	39.3	1068.03	1.7	64	91	508	8.19			165.5571	1.8175573	1.780184	1725.2	2839.2	0.360158276		
9	B-25	1450	327	62.85293	318.4326	76	90	2.7	35	31	21	300	338	11.92	619.51	0.6	700	269	311	3.78			189.6491	3.46482103	3.226732	524.48	1604.48	0.275193301		
10	C-100	1730	1159	265.7904	1128.634	78	92	3.2	36	31	64	436	467	48.4	1487.54	1.5	76	95	383	7.48			182.0984	2.04895317	2.022364	2129.6	3329.6	0.327184812		
11	C-25	1730	314	72.00879	305.7732	75	91	3.2	37	31	23	301	320	15.53	825.74	0.6	780	281	249	3.85			215.6681	3.54470917	3.359644	683.32	2003.32	0.24457753		
12	C-75	1730	874	200.4321	851.1012	76	92	3.2	36	31	47	396	426	37.12	1220.3	1.2	65	93	350	6.59			185.1999	2.19163075	2.150411	1633.28	3073.28	0.312298991		
13	C-50	1730	597	136.9084	581.3586	75	88	3.5	35	31	32	356	382	26.6	1016.1	1.1	148	87	348	5.55			194.2904	2.54861654	2.473918	1170.4	2730.4	0.285834614		
																						CO, г/кВт ч	CH, г/кВт ч	NOx, г/кВт ч	Pт, г/кВтч					
																						1.4	0.51	6.21	0.056					

Регулировочная характеристика по водороду

Gн, кг/ч	Режим	п. об/мин	Ne, условн.	Ne, л.с.	Me, Нм	Твод., С	Тм, С	Рм, кгс/см2	Ттопл.,С	Твезд, С	Рост.г., мм.вод.ст	Тп, С	Тл,С	Gт, кг/ч	Ge, кг/ч	Kx, %	CO, ppm	CH, ppm	NOx, ppm	CO2, %	Pт, г/кВтч	ge, г/л.с.ч	α (без водорода)	α (с водорода м)	Q, МДж/с без учета водорода	Q', МДж/с с учетом водорода	КПД эффективное
0	C-100	1730	960	220.1643	934.848	77	90	3.5	36	36	50	426	430	40.66		1.7								184.6887	1789.04	1789.04	0.34077379
0.42	C-100</																										



## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Цель: оценка дымности без водорода  Режим <u>свободного ускорения</u>	Протокол испытаний № 1										
	Тарировка прибора				Параметры окружающей среды						
	Проверка прибора до испыт, % 1,16				Даление окр. среды 748 мм.рт.ст.						
	Проверка прибора после испыт, % 1,39				Температура окр.сред. 31 °С			Топливо <u>дизельное</u>			
	Тарировка проводилась относительно эталона							давление водорода 4 атм			
Эталон (светофильтр),% 1,27											
Испытание №	Результаты измерения дымности (коэффициент поглощения, 1/м)										
	1	2	3	4	5	6	Среднее арифм.	Сред.арифм (без max и min)	Примечание	Температура(прогрев)	
1	4,88	5,64	4,1	3,53	4,31	3,78	4,37	4,27		60	
2	5,19	4,39	3,3	3,28	3,54	3,89	3,93	3,78	5 минут после первого замера	80	
3	4,31	4,5	5,08	4,41	3,81	3,15	4,21	4,26	5 минут после второго замера	87	

Продолжение приложения Б

Цель: оценка дымности с водородом Режим <u>свободного ускорения</u>	Протокол испытаний № 3						Тарировка прибора Проверка прибора до испыт, % 0,8 Проверка прибора после испыт, % 1,8 Тарировка проводилась относительно эталона Эталон (светофильтр), % 1,27	Параметры окружающей среды Даление окр. среды 750 мм.рт.ст. Температура окр.сред. 28 °С давление водорода 4 атм	Топливо <u>дизельное</u> Плотность воздуха _____ Плотность водорода _____		
	Результаты измерения дымности (коэффициент поглотения, 1/м)										
Испытание Повтор	1	2	3	4	5	6	Среднее арифм.	Сред.арифм (без мах и min)''	Примечание	Температура	Время
10	7,59 <sup>'</sup>	3,23	1,84	1,82	2,96	4,6	3,67	3,15	без водорода, после дождя	70	
11	2,51	2,76	2,31	2,91	2,41	2,29	2,53	2,49	без водорода	80	
12	2,51	2,05	2,54	2,41	2,28	2	2,29	2,31	H2 -0.02 кг/ч	85	
13	2,71	2,36	2,7	4,11	3,75	6,21 <sup>'</sup>	3,64	3,31	H2 -0.02 кг/ч	88	после 3 минут работы
14	2,53	2,51	2,46	2,83	2,41	2,5	2,54	2,5	H2 -0.02 кг/ч	88	после 3 минут работы
15	2,58	2,41	2,98	2,91	3,42	3,13	2,905	2,9	H2 -0.02 кг/ч	88	после 3 минут работы
16	2,28	2,31	2,48	2,84	2,63	2,55	2,515	2,49	без водорода	89	после 3 минут работы
17	2,9	2,22	3,38	3,48	2,99	3,31	3,04	3,14	без водорода	89	после 3 минут работы

<sup>'</sup> - аномальное значение, исключенное из рассмотрения

<sup>''</sup> - среднее значение считаем отбросив максимальное и минимальное значения, для уменьшения погрешности.

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

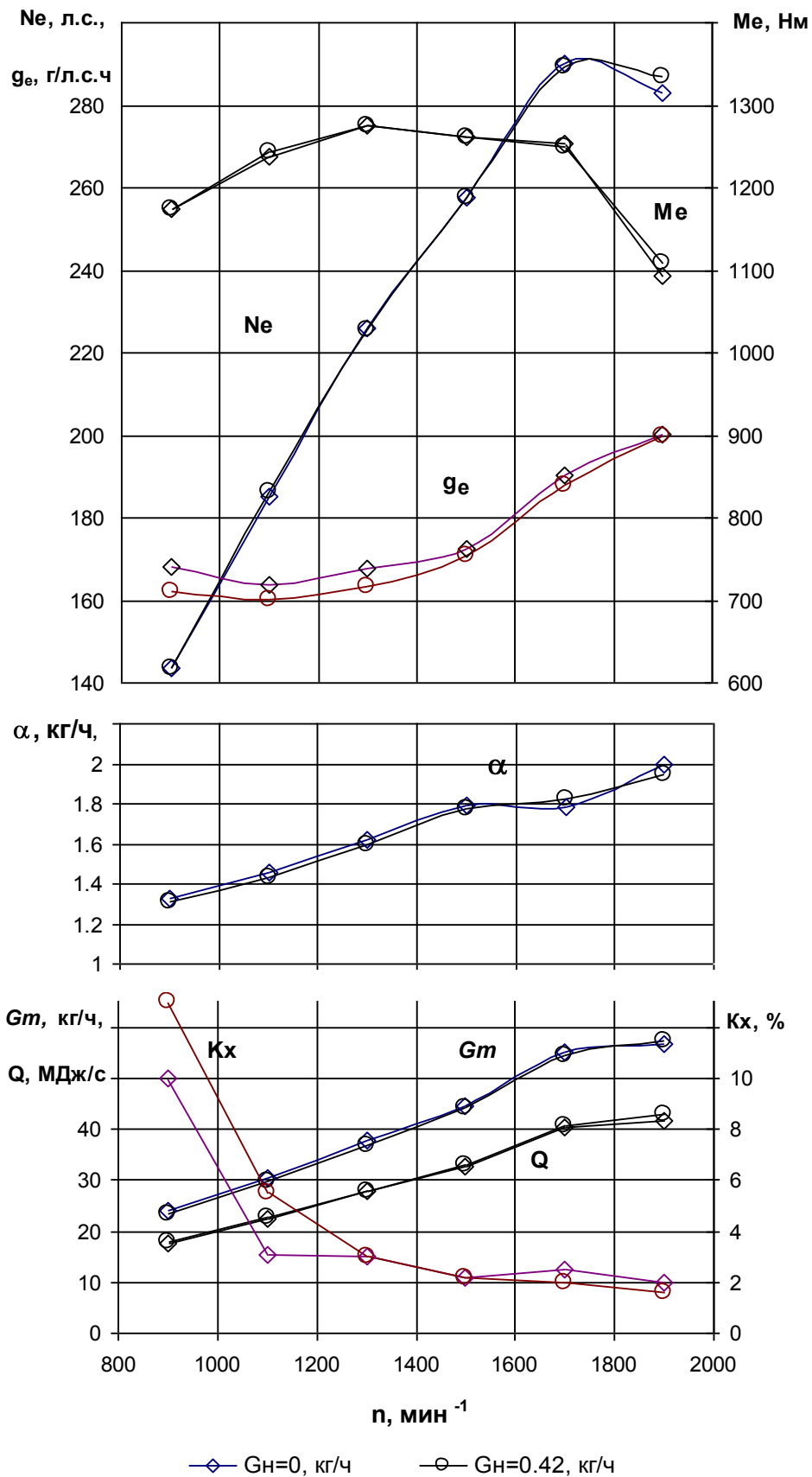


Рисунок В1 – Условная внешняя скоростная характеристика двигателя КАМАЗ 740.62 – 280

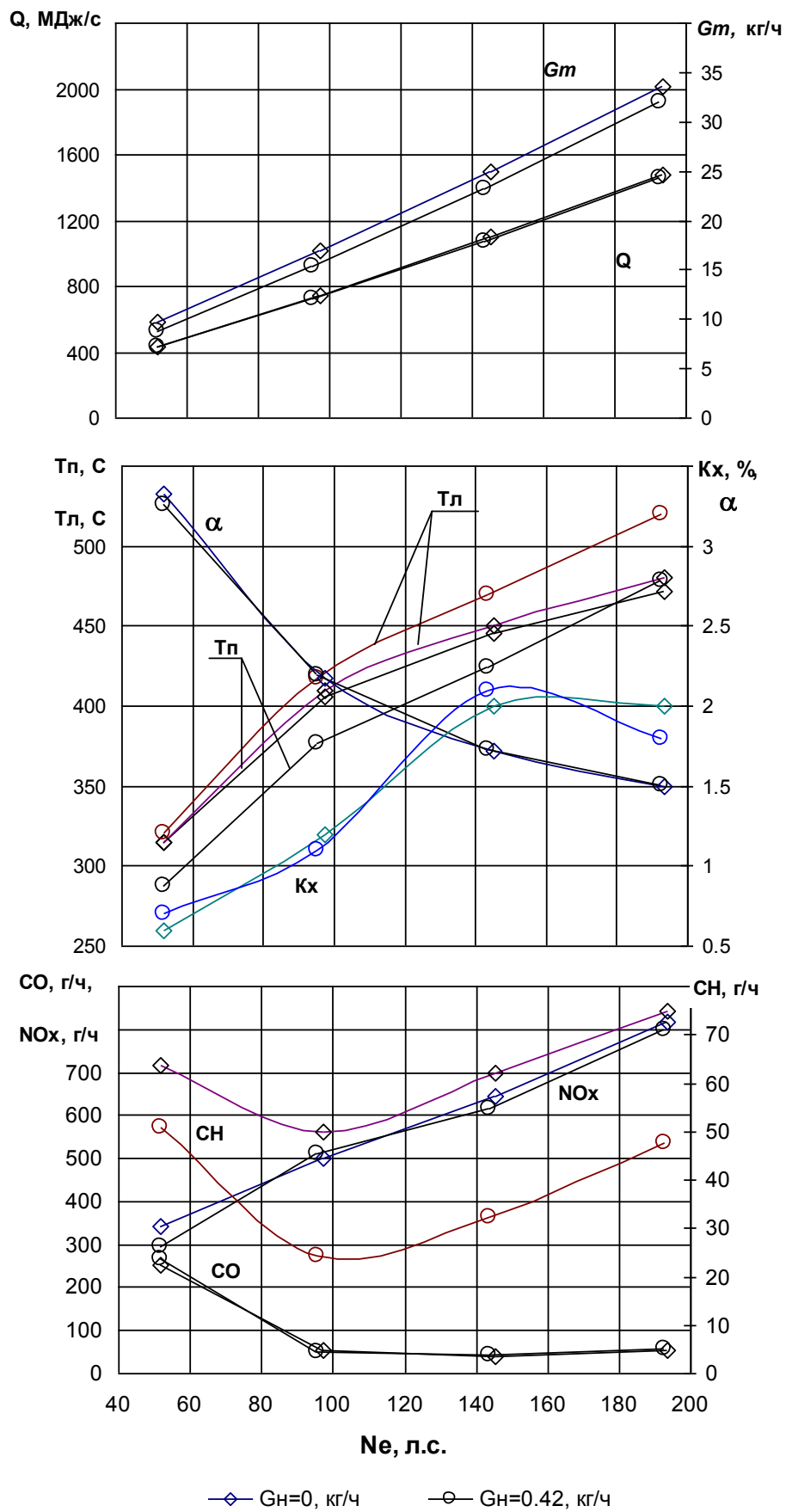


Рисунок В2 – Нагрузочная характеристика двигателя КАМАЗ 740.62 – 280,  $n = 1180 \text{ мин}^{-1}$

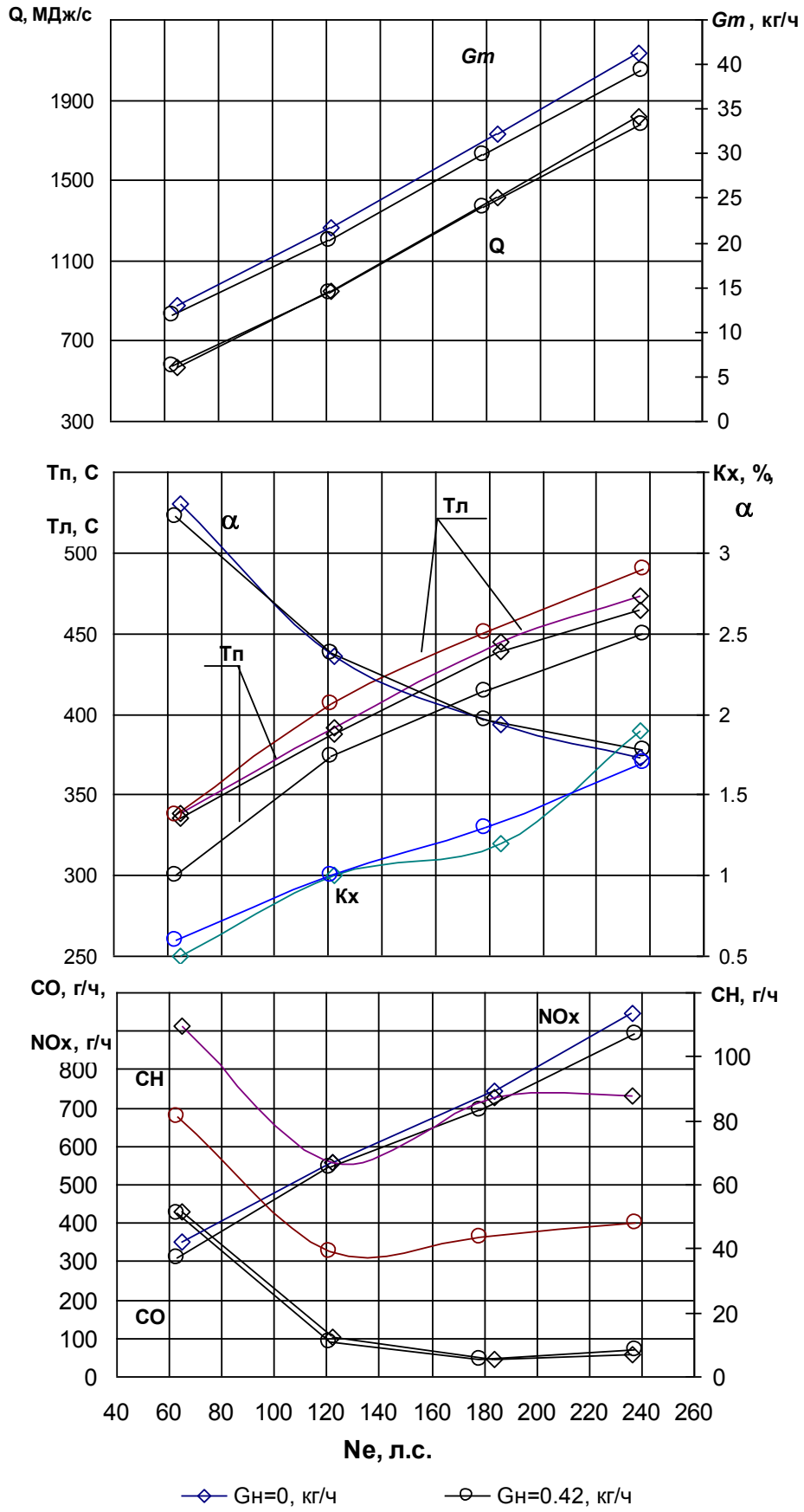


Рисунок В3 – Нагрузочная характеристика двигателя КАМАЗ 740.62 – 280,  $n = 1450 \text{ мин}^{-1}$

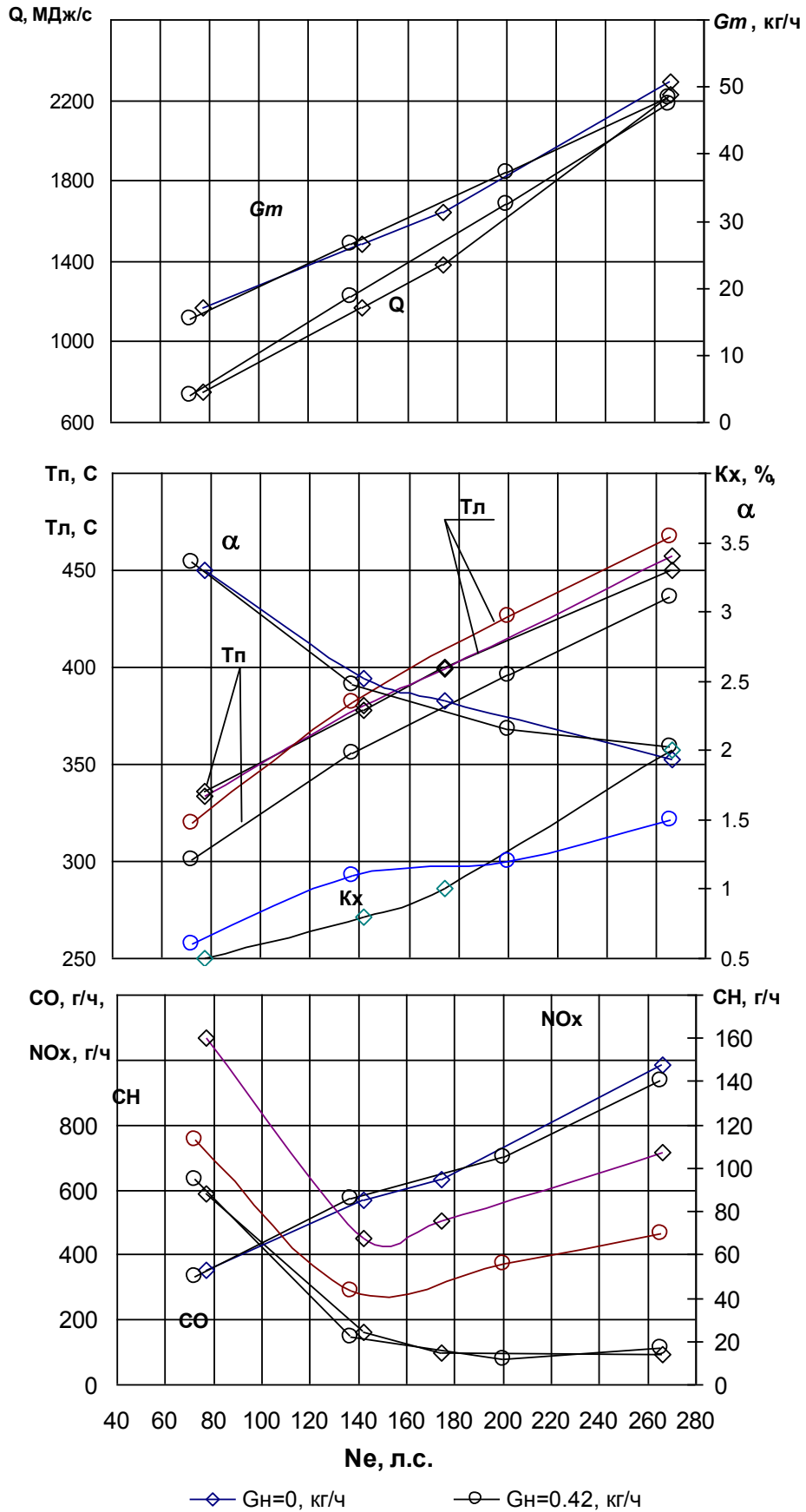


Рисунок В4 – Нагрузочная характеристика двигателя КАМАЗ 740.62 – 280,  $n = 1730 \text{ мин}^{-1}$

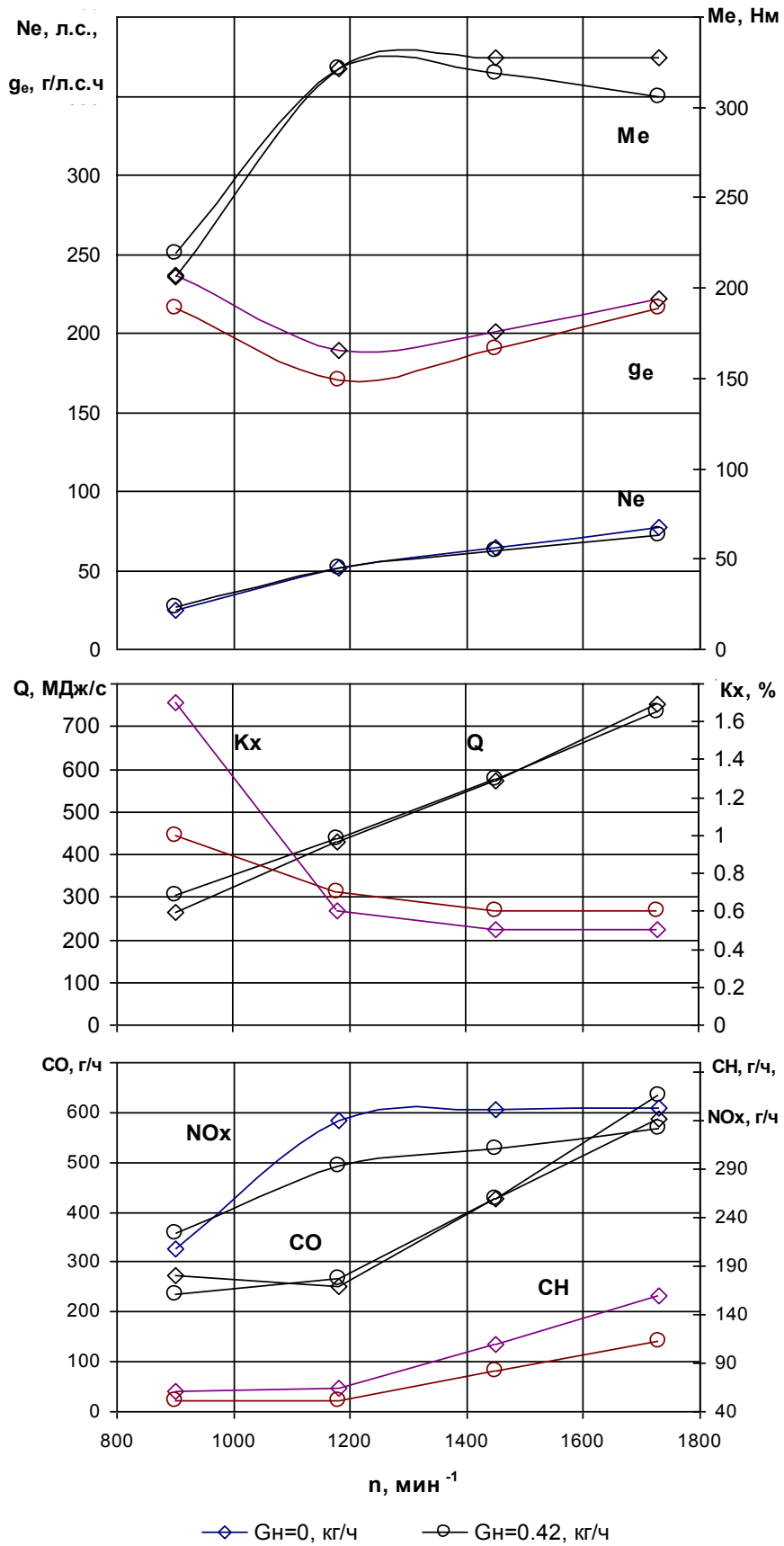


Рисунок В4 – Частичная скоростная характеристика двигателя КАМАЗ 740.62 – 280, 25% открытия топливной рейки ГНВД

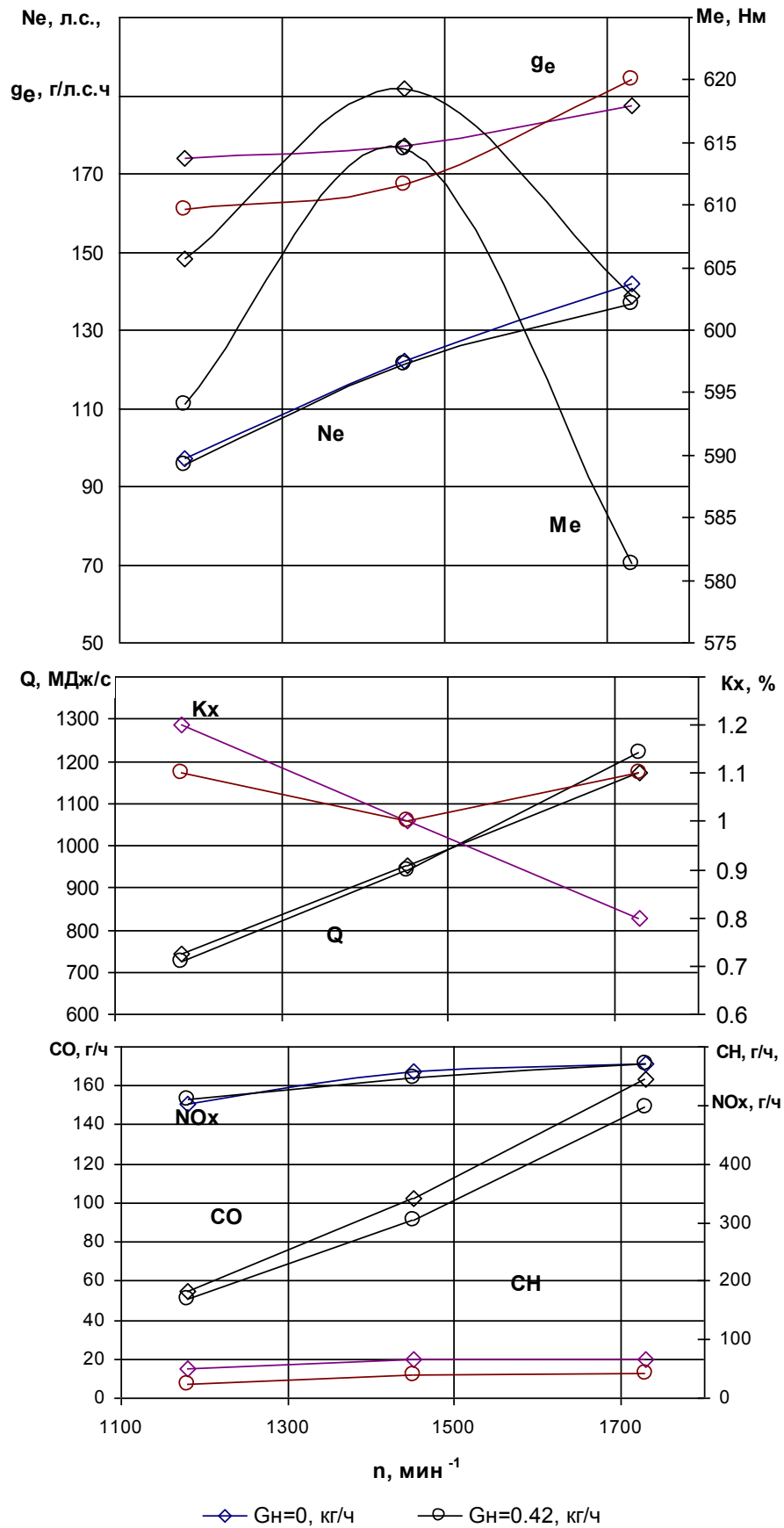


Рисунок В5 – Частичная скоростная характеристика двигателя КАМАЗ 740.62 – 280, 50% открытия топливной рейки ТНВД



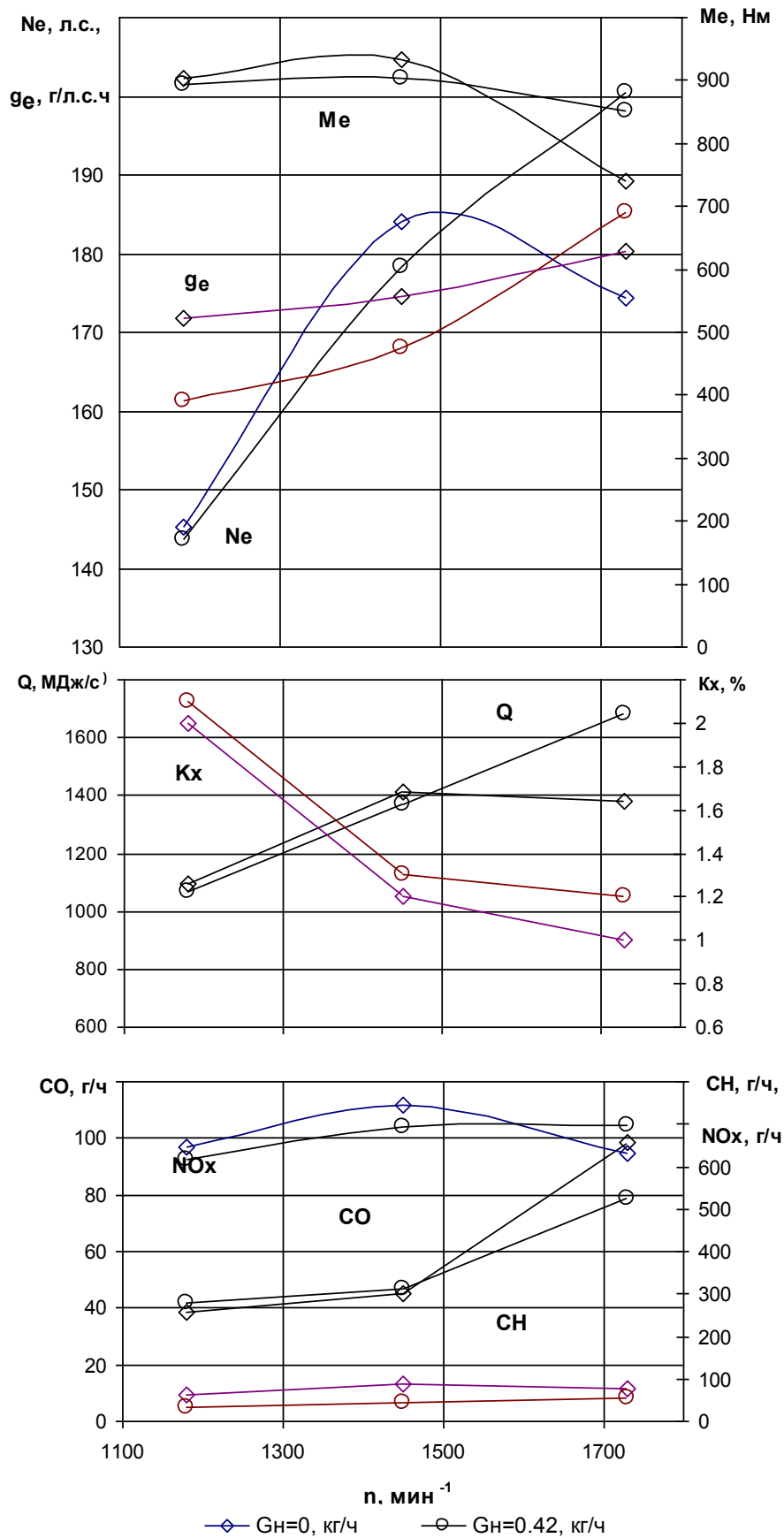


Рисунок В5 – Частичная скоростная характеристика двигателя КАМАЗ 740.62 – 280, 75% открытия топливной рейки ТНВД