

На правах рукописи

Гвоздев Алексей Михайлович

УЛУЧШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИЗЕЛЯ ПУТЕМ
ДОБАВКИ ДИМЕТИЛОВОГО ЭФИРА К ТОПЛИВУ

Специальность 05.04.02 — «Тепловые двигатели»

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Барнаул — 2007

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова (АлтГТУ)»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Вагнер Виктор Анатольевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Кукис Владимир Самойлович

кандидат технических наук, доцент
Брякотин Максим Эдуардович

Ведущая организация: ОАО «ПО АМЗ» г. Барнаул

Защита состоится «13» ноября 2007 года в 12^{30}_{00} часов на заседании диссертационного совета Д 212.004.03 в Алтайском государственном техническом университете им. И.И.Ползунова по адресу: 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46. тел/факс (3852) 260-516; E-mail: D21200403@mail.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Алтайского государственного технического университета им. И.И.Ползунова

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью Вашего учреждения, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета

Автореферат разослан « » октября 2007 г.

Ученый секретарь

А.Е.Свистула

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. На современном этапе развития науки и техники двигатель внутреннего сгорания (ДВС) остается основным типом привода для большинства мобильных и стационарных установок. Этим объясняются высокие темпы использования энергоресурсов, в балансе потребления которых ведущую роль занимают нефть и нефтепродукты. Нефть является невозобновляемым природным ресурсом, поэтому необходим переход к ее более рациональному использованию.

В современных условиях все более возрастающую роль играют экологические проблемы. При значительном увеличении масштабов и росте темпов автомобилизации возникает ряд серьезных вопросов, связанных с вредными для окружающей среды и человека последствиями, сопровождающими этот процесс. Улучшение экологических показателей современного дизеля и экономия топлива, производимого из невозобновляемых ресурсов, являются важными задачами. Их решение может быть достигнуто применением альтернативных топлив. Одним из перспективных топлив, широко рассматриваемых в последние годы, является диметиловый эфир (ДМЭ). Применение ДМЭ позволяет снизить экологическое воздействие дизеля на окружающую среду и расширить сырьевую базу топлив для ДВС.

Цель диссертационной работы: разработка методики и рекомендаций по использованию ДМЭ в качестве добавки к дизельному топливу для улучшения экологических параметров дизеля при обеспечении высоких мощностных и экономических показателей.

Для ее достижения необходимо решить ряд задач:

- оценить перспективность применения ДМЭ в качестве добавки в дизельное топливо;
- определить основные свойства смесевых топлив;
- определить максимальную долю добавки ДМЭ в дизельное топливо и условия подачи смесей с использованием системы топливоподачи непосредственного действия;
- провести экспериментальные исследования влияния добавки ДМЭ на экономические и экологические показатели работы двигателя;
- разработать математические зависимости для прогнозирования эффективных и экологических параметров дизеля, что позволит определить оптимальные регулировочные параметры, улучшающие экономические и экологические характеристики двигателя;
- выработать рекомендации по использованию ДМЭ как добавки к традиционному топливу для дизелей.

Объект исследований: дизель ВАЗ-341 — 4-тактный, 4-цилиндровый, рядный, вихрекамерный, размерностью 76×84 мм (рабочий объем 1,52 литра).

Методика исследования: комплекс расчетно-теоретических и экспериментальных методов. Эксперименты выполнялись с использованием методов математического планирования многофакторного эксперимента и статистической обработки результатов на ЭВМ.

Научная новизна работы: показана возможность подачи готовой смеси диметилового эфира и дизельного топлива на дизеле ВАЗ-341 с использованием штатной топливной системы непосредственного действия; изучены основные свойства смесевых топлив; определены максимальная доля добавки ДМЭ и условия подачи смесей; теоретически и экспериментально показана возможность снижения вредных выбросов дизеля с сохранением основных мощностных и экономических показателей; получена модель влияния смесцевого топлива на основные показатели работы двигателя.

Практическая ценность: представлены рекомендации по применению ДМЭ как добавки в дизельное топливо для улучшения экологических показателей дизеля.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Двигатели внутреннего сгорания — современные проблемы, перспективы развития» (Барнаул, 2006), Международной научно-практической конференции «Ресурсосберегающие технологии технического сервиса» (Уфа, 2007), научно-практической конференции «Наука — городу Барнаулу» (Барнаул, 1999), на научно-практической конференции студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава Алтайского государственного технического университета (Барнаул, 1998-2006). В полном объеме диссертация обсуждалась на заседании кафедр «Детали машин» и «Двигатели внутреннего сгорания» Алтайского государственного технического университета.

Публикации. Основные положения работы опубликованы в 9 печатных работах (в том числе две в изданиях, входящих в перечень, установленный ВАК).

Структура и объем работы. Диссертация содержит 149 страниц, включая 26 таблицы, 47 рисунков и состоит из введения, четырех глав, основных выводов и заключения, списка литературы из 99 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, его научная новизна и практическая ценность.

В первой главе проведен литературный анализ возможной номенклатуры альтернативных топлив для использования в дизельных двигателях.

Переход на альтернативные топлива оправдан, если они могут снизить негативное экологическое воздействие двигателя на окружающую среду и расширить сырьевую базу топлив. При оценке эффективности использования нового топлива необходим комплексный подход к его технико-экономическим показателям. Необходимо учитывать не только показатели его непосредственного применения на двигателе, но и весь комплекс мероприятий по созданию инфраструктуры по его производству, сырьевой базы, транспортировке и т.п. При этом преимущества, получаемые при непосредственном использовании на двигателе могут свестись на нет остальными звеньями технологической цепи. С этой точки зрения рассматривалась возможная номенклатура альтернативных топлив. По результатам анализа было выбрано одно из перспективных топлив — ДМЭ. Применение ДМЭ может расширить сырьевую базу топлив при этом снизить экологическую нагрузку двигателя на окружающую среду.

Вторая глава посвящена рассмотрению вопросов по использованию ДМЭ в качестве моторного топлива. С учетом специфики автомобильного транспорта можно сформулировать пять основных условий перспективности новых энергоисточников: наличие достаточных энергосырьевых ресурсов; возможность массового производства; технологическая и энергетическая совместимость с транспортными силовыми установками; приемлемые токсические и экономические показатели процесса энергоиспользования; безопасность и безвредность эксплуатации. В контексте вышеперечисленных условий рассмотрено применение ДМЭ в качестве моторного топлива.

ДМЭ $\text{CH}_3\text{—O—CH}_3$ ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$) — бесцветный газ со слабым эфирным запахом, после ожигения — легкоподвижная жидкость. ДМЭ относительно инертен, неконцeroгенный и безкоррозионный газ, не является так называемым «парниковым газом». Теплота сгорания превосходит спиртовые топлива, но примерно в 1.5 раза уступает традиционному дизельному. Плотность ДМЭ также ниже. Важно отметить, что теплота сгорания топливовоздушной смеси у ДМЭ выше, чем у ДТ. Более низкая теплота

сгорания обусловлена присутствием в молекуле ДМЭ кислорода, но именно это дает ДМЭ преимущество перед традиционными топливами — экологически чистый выхлоп. Высокое содержание кислорода (около 35%) позволяет получить почти бездымное сгорание в дизельных двигателях. На это влияет и то, что в молекуле отсутствует связь C—C. Оптимизация систем впрыскивания и процесса сгорания позволяет при работе на ДМЭ снизить выброс NO_x . Выброс CO_2 в продуктах сгорания при работе двигателя на ДМЭ практически такой же, как и у дизельного двигателя. ДМЭ обладает высоким цетановым числом, что позволяет организовать чисто дизельный цикл.

Сырьевая база для производства ДМЭ соответствует сырьевой базе производства метанола. Институтом нефтехимического синтеза им. А.В.Топчиева РАН разработан процесс получения ДМЭ непосредственно из синтез-газа в одну стадию. Экономические показатели процесса характеризуются тем, что себестоимость ДМЭ ниже себестоимости эквивалентного количества метанола. Производство может быть освоено в короткие сроки на базе существующих производств.

Различия в физико-химических свойствах ДМЭ и ДТ предполагают некоторые трудности при использовании ДМЭ в качестве топлива:

- Низкая теплота сгорания требует для получения равных энергетических показателей двигателя увеличения цикловой подачи.
- Низкая вязкость обуславливает плохие смазывающие свойства, так же этот показатель предполагает высокий уровень утечек ДМЭ через зазоры в прецизионных парах.
- Высокое давление насыщенных паров предполагает для исключения образования паровых пробок в ЛНД поддержания высокого давления подкачки наряду с повышенной степенью рециркуляции отсеченного топлива. Так же при использовании ДМЭ возрастает вероятность возникновения кавитационных явлений в топливной системе.
- ДМЭ является химически агрессивным веществом к некоторым уплотняющим материалам и пластмассам, используемым в штатных топливных системах.
- Сжимаемость ДМЭ, зависящая от температуры и давления, больше, чем у ДТ. Это вызывает затруднения при впрыскивании ДМЭ при высоких температурах и на полных нагрузках при использовании штатных ТНВД.

В главе рассмотрены как существующие, так и концептуальные топливные системы для подачи ДМЭ в чистом виде (системы фирмы AVL, НИИД-ЗИЛ) и системы организующие подачу ДМЭ в виде добавки к ДТ (системы, разработанные Н.Н.Патрахальцевым, МГТУ и др.). Однако в первом случае это требует серьезной адаптации топливной системы к свойствам ДМЭ, а во втором случае для эффективного управления подачей ДМЭ требуется наличие электронного управления. В то же время, одним из способов использования ДМЭ в качестве добавки к ДТ может быть подача заранее готовой смеси ДМЭ и ДТ. Известно, что ДМЭ растворяется в ДТ, хотя это и представляет определенную проблему, так как его растворимость строго зависит от окружающей температуры и поэтому сложно сохранить устойчивую концентрацию смеси. Но этот способ подачи вызывает интерес, так как вышеописанные системы подачи ДМЭ (чистого) и ДМЭ+ДТ требуют значительной модернизации штатной топливной системы или создания принципиально новой. В этом же случае, при растворении 10...30% (по массе) ДМЭ в ДТ можно использовать штатную топливную систему за исключением некоторых элементов, при этом преимущества ДМЭ (с экологической точки зрения) хотя и в не полной мере могут быть использованы. Данное направление в применении ДМЭ в качестве топлива для дизелей было выбрано для дальнейших исследований.

В третьей главе проведены расчетно-экспериментальные исследования основ-

ных моторных и физических свойств смесевых топлив, теоретические исследования влияния добавки ДМЭ на работу дизельного двигателя.

Возможность растворения ДМЭ в ДТ была подтверждена в докладе академиков МАХ С.Д.Глухова, А.А.Жердева, а так же А.Н.Левко, А.А.Лелюха и А.В.Шарабурина (МГТУ им. Н.Э.Баумана, «Исследование фазового равновесия бинарной смеси диметиловый эфир — дизельное топливо»). При рассмотрении растворимости сжиженного ДМЭ в дизельном топливе, которые должны находиться в жидком состоянии, можно отметить, что фазовое состояние смеси не является основным для этих исследований. Основным для нормальной эксплуатации двигателей внутреннего сгорания является выяснение устойчивости этой смеси во времени, т.е. характер ее расслоения. В работе были проведены такие исследования. В качестве контролируемых параметров приняты удельная и молекулярная массы. Анализы проб показывали, что их состав не изменялся за все время эксперимента. Результаты представлены на рисунке 1. Таким способом были исследованы смеси с содержанием ДМЭ 40%, 35% и 20%. Следует отметить, что при содержании 40% ДМЭ, состав проб сильно зависел от давления и температуры окружающей среды. Таким образом, можно считать, что стойкость смесей с содержанием ДМЭ до 35% вполне достаточна для использования их на автотранспорте, учитывая и то, что смеси предполагается хранить в герметичных сосудах, а при эксплуатации баллоны будут постоянно встряхиваться.

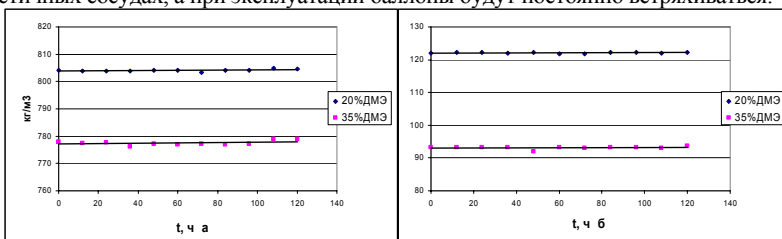


Рисунок 1 Изменение параметров смеси в зависимости от времени выдержки
(а — удельная масса жидкости; б — молекулярная масса жидкости)

Элементарный состав смесевое топлива меняется с увеличением доли ДМЭ, причем количество водорода остается практически неизменным при одновременном снижении доли углерода и увеличении доли кислорода. Это предполагает значительное снижение выбросов сажи при работе двигателя на смесевых топливах. Увеличение в топливе доли кислорода снижает теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива, одновременно это ведет к снижению низшей теплоты сгорания, что требует для сохранения энергетических показателей двигателя увеличения цикловой подачи, однако следует заметить, что низшая теплота сгорания стехиометрической смеси незначительно повышается, поскольку для сгорания ДМЭ требуется меньшее количество воздуха (см.рис.2). Плотность смесевое топлива несколько ниже традиционного дизельного (до 12% при содержании 50% ДМЭ в смеси). Это обстоятельство может вызвать увеличение коэффициента избытка воздуха, так как топливо дозируется по объемным показателям и весовой расход топлива окажется меньше, чем для ДТ.

Наиболее важным параметром топлив для дизельных двигателей является цетановое число. Отдельным вопросом является определение ЦЧ смесевых топлив с кислородосодержащими соединениями. Анализ литературных данных показывает, что принцип аддитивности при определении ЦЧ может дать неверный результат. Эксперимент показал, что ЦЧ смесей будет несколько меньшим, чем при расчете по методу аддитивности (см.рис.3). Некоторое повышение ЦЧ смесей по сравнению с традици-

онным дизельным топливом предполагает уменьшение периода задержки воспламенения. Следует отметить, что данные ЦЧ были получены для смеси дизельного топлива с «техническим» ДМЭ, в составе которого допускается наличие до 19% метанола, присутствие которого оказывает заметное влияние на ЦЧ.

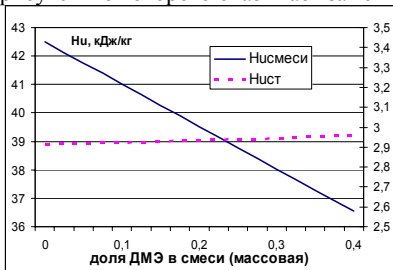


Рисунок 2 Низшая теплота сгорания смеси (ДМЭ+ДТ) и стехиометрической смеси

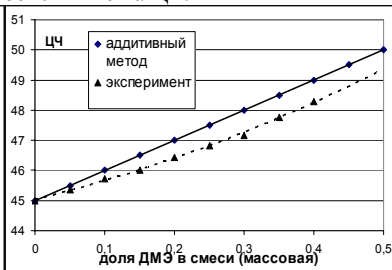


Рисунок 3 Изменение цетанового числа смеси

Значительное снижение вязкости смесового топлива (при содержании в смеси 50% ДМЭ примерно в 10 раз) резко ухудшает смазочные свойства топлива, что снижает надежность топливной аппаратуры. Изменение вязкости носит нелинейный характер и хорошо описывается выражением, предложенным Кендаллом и Монроу: $\mu_{см}^{1/3} = x_1 \mu_1^{1/3} + x_2 \mu_2^{1/3}$, где x_1 и x_2 — мольные доли компонентов смеси (см.рис.4).

Фракционный состав топлива при добавке ДМЭ значительно расширяется в сторону увеличения содержания легких фракций. Температура начала разгонки снизилась с 171 °С до -24,9 °С.

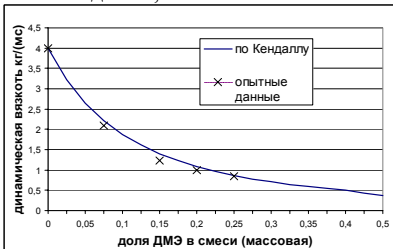


Рисунок 4 Изменение вязкости в зависимости от состава смеси

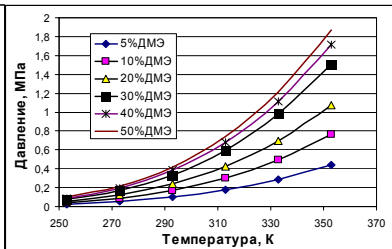


Рисунок 5 Давление упругости насыщенных паров смесей

Применение смесового топлива может повлечь за собой уменьшение мощности дизеля. Это связано со многими факторами. Меньшая теплота сгорания смесового топлива требует для сохранения мощностных показателей корректировку цикловой подачи (ЦПТ). При этом следует учитывать, что при переходе на смесовое топливо уменьшается масса ЦПТ, что обусловлено меньшими плотностью и вязкостью, по сравнению с дизельным, а также их большей сжимаемостью. От вязкости и сжимаемости топлива зависит объемная ЦПТ. Это выражается в изменении коэффициента подачи ТНВД. Основным фактором влияния пониженной вязкости смесового топлива на ЦПТ являются утечки топлива через зазоры прецизионных пар топливоподающей аппаратуры. Увеличение хода плунжера для сжатия, более сжимаемого смесового топлива в надплунжерной области до требуемого давления ведет к уменьшению ЦПТ. Для сохранения цикловой подачи требуется большая продолжительность впрыска. Высвобождение энергии формирует вялое окончание впрыска. При переходе на более сжимаемое топливо изме-

няются параметры топливоподачи. Возможны задержка начала и конца подачи, уменьшение $P_{впр.}$ без компенсации активным ходом плунжера уменьшение $g_{ц.}$. С компенсацией $g_{ц.}$ увеличивается продолжительность подачи, возможно появление подвпрыска.

Одним из свойств смесевых топлив, которое затрудняет их применение, является высокое давление насыщенных паров. Трудности вызывает и то, что оно имеет сильную зависимость от температуры (см.рис.5). С учетом того, что в топливной системе возникают волны разрежения, смесевое топливо может переходить в двухфазное состояние. Для минимизации негативных последствий, давление подкачки смесевых топлив должно быть значительно выше давления насыщенных паров и для уменьшения возможности образования паровых пробок должна быть организована высокая степень рециркуляции топлива. Давление подкачки зависит от состава смеси. В свою очередь, на производительность топливного насоса влияет давление подкачки.

Были проведены экспериментальные безмоторные проливки ТНВД (Bosch VE 4/8 F 2400 RTV 14136) для определения оптимального давления подкачки (рисунок 6). Следует отметить, что оптимальное давление подкачки для смесей примерно на 0,3...0,5 МПа выше, чем давление насыщенных паров, соответствующих смесей. Согласно результатам экспериментальной проливки и с учетом различных составов смесей и возможного колебания температурного режима, для практического использования на двигателе было принято давление подкачки, равное 1,5 МПа.

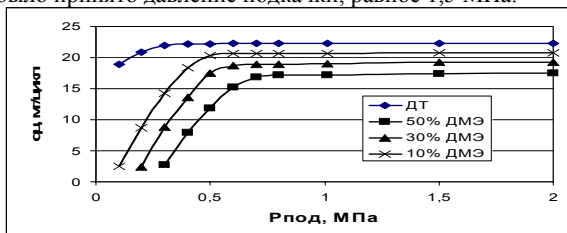


Рисунок 6 Изменение цикловой подачи от давления подкачки для различных топливных смесей

Учитывая свойства смесевых топлив и данные, опубликованные в ряде работ по применению ДМЭ в качестве топлива, были сделаны некоторые выводы:

Для компенсации большего расхода смесового топлива целесообразно увеличение диаметра плунжера ТНВД, уменьшающее продолжительность впрыскивания, что приводит к более быстрому сгоранию и повышению КПД. Уменьшение давления начала впрыска для смесового топлива может увеличить цикловую подачу за счет снижения остаточного давления в трубопроводе высокого давления.

Оптимальный УОВ для смесей будет несколько меньшим, чем у ДТ благодаря более высокому ЦЧ, меньшей температуре самовоспламенения и лучшей молекулярной структуре смесевых топлив.

Задержка впрыскивания смесового топлива больше, чем у ДТ, из-за меньшей скорости звука и, следовательно, меньшей скорости распространения волны давления (задержка впрыскивания — задержка между началом активного хода плунжера и поднятием иглы распылителя).

Задержка воспламенения смесового топлива будет меньше чем у ДТ. Это объясняется более высокими ЦЧ, меньшими температурами самовоспламенения, лучшими молекулярными структурами этих топлив и более высокими давлением и температурой в цилиндре в момент впрыскивания из-за меньших оптимальных УОВ.

Значения максимального давления и максимальной скорости роста давления при

работе на смесевых топливах будут меньше, чем при работе на ДТ, причем как по величине, так и по расположению относительно ВМТ.

Характеристики скорости тепловыделения при работе на смесевых топливах будут несильно отличаться от аналогичных для ДТ, эти топлива имеют, как правило, два пика скорости тепловыделения: сгорания топливо-воздушной смеси, подготовленной за время задержки воспламенения и за время диффузионного сгорания. Максимальное значение скорости тепловыделения сгорания топливо-воздушной смеси, подготовленной за время задержки воспламенения, при работе на смесевых топливах будет несколько ниже, чем на ДТ. Интервалы между пиками также будут меньше. Это будет обуславливаться более быстрым диффузионным сгоранием смесей за счет более быстрого смешения и большей скорости диффузии, которые приведут к более короткой продолжительности сгорания.

В главе рассмотрены вопросы образования сажи и оксидов азота при работе на смесевых топливах. В модель образования вредных веществ основанной на работах Разлейцева Н.Ф., Батурина С.А., Вагнера В.А., Русакова В.Ю. были внесены изменения отражающие отличия физико-химических свойств топлива при введении в него ДМЭ. В модель образования и выгорания сажи предложенную Батуриным С.А. и его школой в систему эквимолекулярных брутто-уравнений реакций введено уравнение термического разложения молекулы ДМЭ, которое идет по радикальному механизму с образованием низкомолекулярных углеводородных соединений и атомарного кислорода: $C_2H_6O = 2CH_3 + O$. Необходимым и достаточным условием образования в цилиндре дизеля сажи является наличие и взаимодействие в камере сгорания высокотемпературных и переобогащенных топливом зон. В нашем случае это условие не является так ярко выраженным как при подаче ДТ. В переобогащенных топливом зонах недостаток кислорода воздуха, не поступающего в эти зоны, частично восполняется вследствие диссоциации молекулы ДМЭ атомарным кислородом, содержащимся в топливе. Основным продуктом для последующего образования сажистых частиц является ацетилен. Сырьем для образования ацетилена являются продукты термического и окислительного крекинга индивидуальных углеводородов. В нашем случае концентрация данных продуктов ниже по сравнению с крекингом ДТ. Вследствие этого резко уменьшается количество центров образования зародышей сажистых частиц. Одновременно с процессами образования сажистых частиц идут процессы их выгорания и сублимации. Они протекают одновременно с процессами образования сажи и конкурируют с ними. Сочетание данных факторов при подаче смеси (ДТ+ДМЭ) приводит к значительному сокращению сажи в ОГ дизеля.

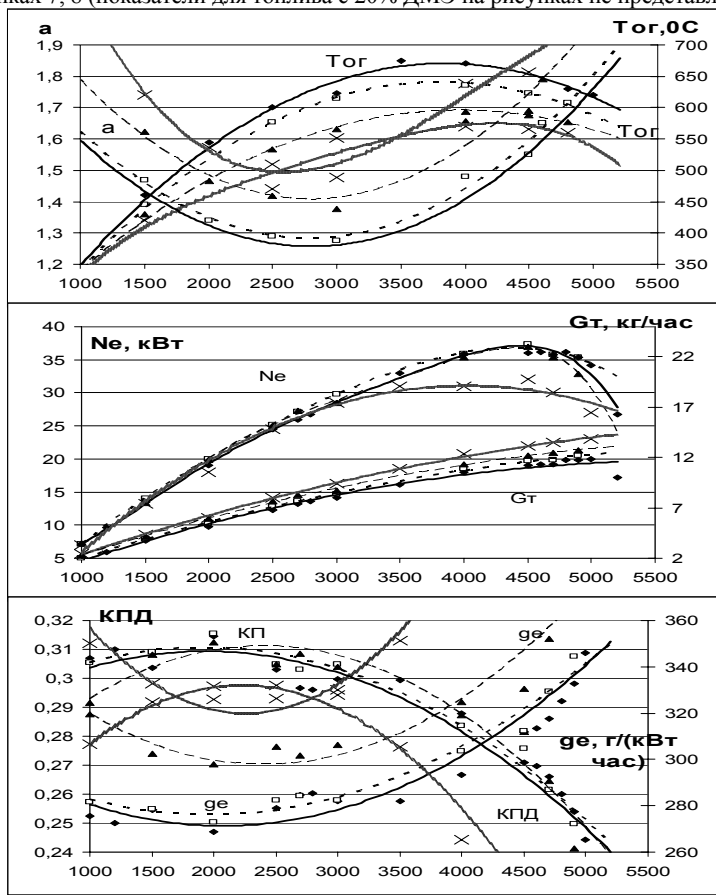
Образование NO_x имеет чисто термическую природу, определяясь температурой пламени, которая в свою очередь связана с максимальной температурой цикла. Довбака же ДМЭ снижает эту температуру, и соответственно снижаются выбросы NO_x .

В четвертой главе описана экспериментальная установка, оценены погрешности измерений, приведены результаты моторных испытаний.

Моторные испытания проводились методом снятия внешней скоростной и нагрузочных характеристик при оборотах двигателя 1800, 2500, 3000 и 4000 мин⁻¹ при работе на топливах, содержащих 10, 20, 30 и 40% ДМЭ. Результаты моторных испытаний были обработаны методами математической статистики.

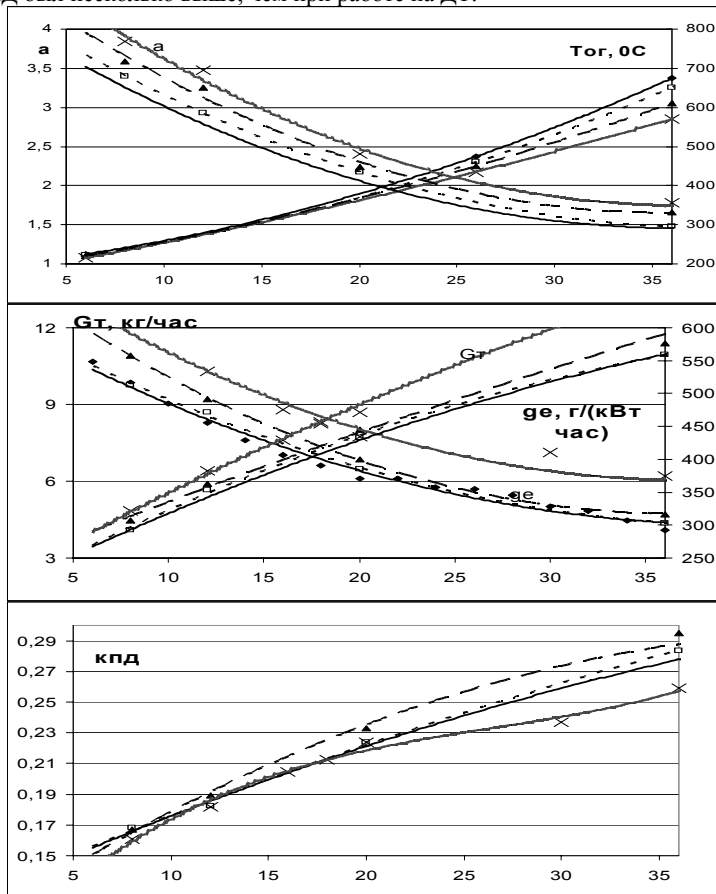
В предварительных испытаниях участвовали топлива с содержанием 10, 20, 30, 40 и 50% ДМЭ. Однако при установленном давлении подкачки в 1,5 МПа двигатель на топливе с содержанием 50% ДМЭ работал нестабильно. Увеличение давления подкачки не дало положительных результатов. В процессе работы происходило резкое снижение производительности ТНВД, отличие от расчетной подачи достигало до 30%. Это, скорее

всего, связано с увеличением температуры на входе в ТНВД и возможным увеличении газовой фазы в ЛНД. При работе на топливе с 40% ДМЭ при данном давлении подкачки (1,5 МПа) не удалось получить мощностных характеристик, сравнимых с работой на ДТ. При снижении давления подкачки аналогичная картина наблюдалась с топливом с 30% ДМЭ. При этом стабильная работа на топливе с 40% ДМЭ становилась практически невозможной. Этот факт подтверждает ранее выдвинутую гипотезу об увеличении газовой фазы в ЛНД и возникновении паровых пробок. При проведении моторных испытаний на смесевых топливах выявилась необходимость подбора регулировок топливоподающей аппаратуры, вызванная падением мощности. Изменению подлежали угол опережения впрыска и давление начала впрыска форсунок. Подбор оптимальных регулировок происходил для каждого смесевого топлива. Критерий — достижение мощностных показателей, характерных для ДТ. Сравнительные характеристики представлены на рисунках 7, 8 (показатели для топлива с 20% ДМЭ на рисунках не представлены).



Частота вращения, мин^{-1}
 ◆ — ДТ, ■ — 10% ДМЭ, ▲ — 30% ДМЭ, × — 40% ДМЭ
 Рисунок 7 Скоростная характеристика

Моторные испытания выявили следующие особенности при работе на смесевых топливах. Эффективная мощность для топлив с содержанием до 30% ДМЭ (включительно) сопоставима (при соответствующих регулировках) с аналогичным показателем при работе на ДТ. Часовой и удельный расход смесового топлива на полной нагрузке имеет тенденцию к увеличению (см.рис.7,8). Отмечено снижение температуры отработавших газов, повышение коэффициента избытка воздуха. При этом эффективный КПД был несколько выше, чем при работе на ДТ.



Эффективная мощность, кВт
 ◆ — ДТ, ■ — 10% ДМЭ, ▲ — 30% ДМЭ, × — 40% ДМЭ
 Рисунок 8 Нагрузочная характеристика при $n=4000 \text{ мин}^{-1}$

При добавке в топливо 10% ДМЭ коэффициент избытка воздуха остался примерно тем же, что и при работе на ДТ (незначительно выше). На холостом ходу не зафиксировано значительного роста расхода топлива, температура отработавших газов изменяется незначительно (в пределах погрешности измерений). С увеличением нагрузки разницы в работе двигателя на данном топливе и дизельном практически не ощущается. Заметно некоторое снижение температуры отработавших газов. Разница

становится более ощутимой с увеличением нагрузки и скоростного режима. На номинальном режиме измеряемая температура ниже на 4% по сравнению с ДТ. Удельный расход топлива близок к показателям при работе на дизельном топливе. Следует отметить незначительное повышение эффективного КПД при работе по внешней скоростной характеристике. Повышение эффективного КПД наблюдается на всех скоростных режимах при росте нагрузки. В целом эффективные показатели дизеля при работе на данной смеси были практически идентичны показателям ДТ.

При использовании смесей 20 и 30% ДМЭ дизель работал с коэффициентом избытка воздуха несколько большим, чем при работе на ДТ. На малых нагрузках наблюдался заметный рост расхода топлива по сравнению с дизельным, на всех скоростных режимах, по причине низкой температуры в камере сгорания. Возрастание нагрузки при том же скоростном режиме приводит к росту температурного режима и, вследствие этого, к уравниванию экономических показателей дизеля. Эффективный КПД при малых нагрузках оказался ниже, чем у ДТ, далее по мере роста нагрузки КПД начинает возрастать и превышает аналогичный показатель для ДТ. Характер изменения температуры отработавших газов схож с описанным для топлива с 10% ДМЭ. Отличие состоит в том, что измеренные значения на всех скоростных режимах еще более снизились, на номинальном режиме работы температура отработавших газов снизилась по сравнению с ДТ на 6 и 9% соответственно.

В целом моторные испытания показали возможность применения в дизеле топлив с долей ДМЭ до 30% без модернизации существующей топливной аппаратуры. Эффективные показатели работы двигателя при этом практически не изменились. Величины приведенных в энергетическом отношении к ДТ удельных расходов смесевых топлив были примерно такими же или несколько лучше, как при работе двигателя на ДТ ($g_e = idem$). Отличия физико-химических свойств смесевых топлив от ДТ для сохранения мощностных показателей могут быть скомпенсированы настройкой параметров топливной системы.

Работа дизеля на топливе с 40% ДМЭ признана неудовлетворительной. Питание данной смесью приводит к снижению мощности при всех оборотах. Наиболее сильные отличия зафиксированы на оборотах выше 3000 мин^{-1} . Вырос удельный расход топлива. Подбор регулировок топливной аппаратуры не привел к значительному улучшению работы дизеля. Увеличение давления подкачки с 1,5 МПа до 1,8 МПа не дало положительного результата. Снижение же давления подкачки ведет к резкому снижению мощности дизеля. Наилучшая работа дизеля была отмечена при 2500 мин^{-1} . На этом режиме двигатель имел приемлемые мощностные показатели, отмечено минимальное отличие удельного расхода топлива. Повышение и снижение оборотов ухудшают работу двигателя, причем резкое ухудшение показателей наблюдалось по мере роста скоростного режима. Неудовлетворительность работы дизеля на данной смеси, скорее всего, связана со снижением производительности топливного насоса, что объясняется меньшей удельной массой смеси, большей сжимаемостью, малой вязкостью, высокой испаряемостью. Увеличение давления подкачки не дает результата, очевидно насос исчерпал запас производительности. Т.е. для успешной работы на данной смеси необходимо увеличение диаметра плунжера или изменение конструкции других элементов.

Была проверена возможность работы дизеля на топливах с большим процентом содержания ДМЭ. Были произведены пробные пуски двигателя на топливах с составом смеси 50 и 70% ДМЭ. На данной установке не удалось достигнуть мощностных показателей, которые достигались при использовании ДТ и топлив с меньшей долей

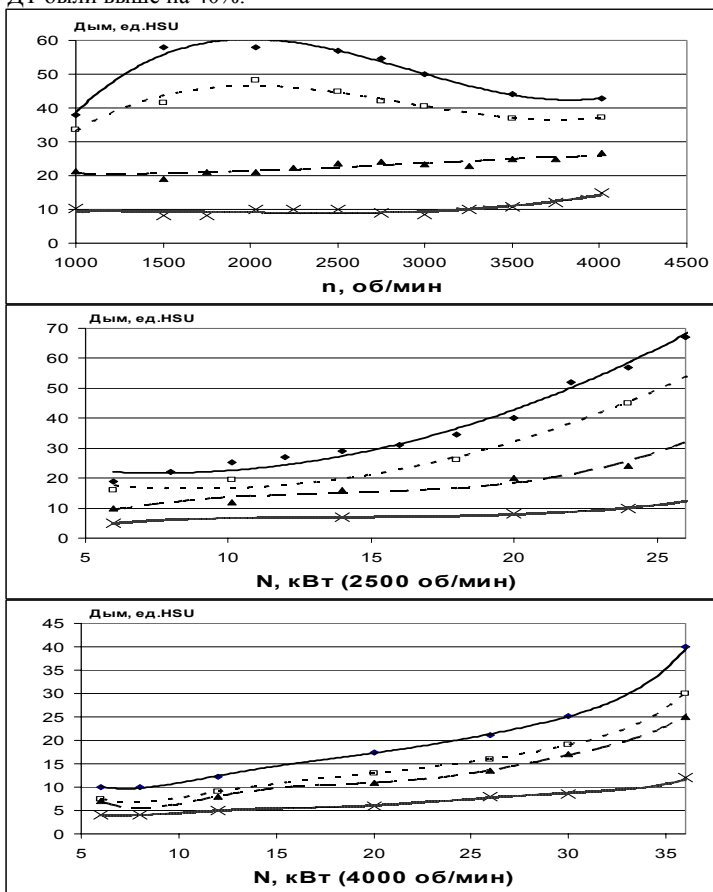
ДМЭ. При этом работа двигателя была нестабильна, особенно на малых оборотах. При увеличении скоростного режима двигатель начинал работать более устойчиво. На малых оборотах резко возрастал расход топлива. При повышении нагрузки, с ростом температурного режима, резко снижалась производительность топливного насоса. Это очевидно связано с выделением газовой фазы из смесового топлива и возникновением паровой пробки. Увеличение давления подкачки до не привело к положительному результату. Наблюдалось запаздывание впрыска. Большую опасность представляли пары просочившегося ДМЭ. В то же время можно сказать, что дизель имеет возможность работы на этих смесях при условии модернизации топливной системы.

Добавка в топливо ДМЭ резко снижает дымность отработавших газов на всех скоростных и нагрузочных режимах (рисунок 9). К такому результату приводит более высокое содержание кислорода в молекуле ДМЭ, отсутствие связей $C-C$, лучший процесс смесеобразования, что приводит к снижению дымности даже на неоптимизированных режимах. Максимальное снижение дымности по нагрузочной характеристике $n=4000\text{мин}^{-1}$ для топлив с 10, 20 и 30% ДМЭ в сравнении с ДТ — 15, 37,5 и 70% соответственно. По нагрузочной $n=2500\text{мин}^{-1}$ соответственно 21, 58 и 82,5%. Такие высокие относительные показатели снижения дымности на режиме $n=2500\text{мин}^{-1}$ объясняются повышенным дымлением дизеля при работе на ДТ на данном скоростном режиме. Что вероятно связано с неоптимальностью настроек параметров топливной аппаратуры. Примечательно и то, что при пробных пусках дизеля на топливах с содержанием 50 и 70% ДМЭ уровень дымности так же был зарегистрирован довольно низким (снижение по сравнению с ДТ примерно в 3,5-4,5 раза у топлива с 50% ДМЭ и в 5-6 раз у топлива с 70% ДМЭ), хотя при этом, эффективные параметры двигателя были крайне низкими. Это еще раз указывает на то, что при использовании смесовых топлив с большой долей ДМЭ в своем составе, можно добиться практически бездымного выхлопа.

Выбросы оксидов азота снизились на всех режимах, при которых проводились испытания. Максимальное снижение выбросов для топлив с 10, 20 и 30% ДМЭ по нагрузочной характеристике $n=4000\text{мин}^{-1}$ было 5,1, 10,5, 17,6% соответственно и для режима $n=2500\text{мин}^{-1}$ — 4,7, 9,3, 11%. Объяснить снижение содержания NO_x в отработавших газах можно тем, что при переходе на смесовое топливо снижается максимальная температура цикла, а, как известно, образование NO_x имеет чисто термическую природу, то есть определяется температурой пламени, которая в свою очередь связана с максимальной температурой цикла. Снижение выбросов NO_x коррелируется с уровнем снижения температуры ОГ при работе на смесовых топливах, хотя последняя не совсем отражает температуру цикла.

При переходе на смесовое топливо содержание CH в отработавших газах заметно увеличивается. Сравнивая данные по выбросам углеводородов, необходимо иметь в виду многообразие механизмов образования и окисления CH в дизеле. Источниками образования CH могут быть холоднопламенные процессы, неполнота выгорания в зонах с переобогащением или переобеднением топливовоздушной смеси, пленка масла на зеркале цилиндра, гашение пламени у стенок цилиндра, подтекание топлива из колодца перед распыливающими отверстиями после посадки иглы на седло. Значительное влияние на выбросы CH оказывают процессы окисления в процессе расширения и выпуска. При работе на топливе с содержанием 10% ДМЭ по массе, рост выбросов углеводородов был незначительным. Увеличение доли ДМЭ в топливе вызвало появление в составе отработавших газов углеводородов. Причем наибольшие концентрации были на малых нагрузках. Далее с увеличением нагрузки происходило

некоторое снижение концентрации CH в отработавших газах. По нагрузочной характеристике при $n=4000\text{мин}^{-1}$ концентрация CH в отработавших газах сильно возросла. При содержании в смеси 30% ДМЭ концентрация CH при максимальной нагрузке выросла на 27,4% по сравнению с ДТ. На малых же нагрузках показатели CH по сравнению с ДТ были выше на 40%.



♦ — ДТ, ■ — 10% ДМЭ, ▲ — 20% ДМЭ, × — 30% ДМЭ
Рисунок 9 Дымность отработавших газов дизеля ВАЗ-341 при работе по внешней скоростной и нагрузочных характеристиках

Использование топлива с 10% ДМЭ не привело к существенному изменению концентрации CO . Отмечен рост в среднем на 5...8%. Рост CO несколько увеличивался при снижении скоростного режима. Так при максимальной топливоподаче при 2500мин^{-1} концентрация возросла на 8%, при 4000мин^{-1} — на 5%. В то же время выявились некоторые особенности. При холостом ходе и малых нагрузках наблюдался относительный рост CO , далее при увеличении нагрузки концентрация несколько снижалась на всех скоростных режимах.

Топливо с 30% ДМЭ вызвало повышение уровня CO на всех режимах. На малых на-

грузках уровень CO превышал эталонные выбросы на ДТ на 25...30%. Далее, с увеличением нагрузки, разница в содержании CO в отработавших газах у смеси и ДТ сокращается, а при высоких нагрузках наблюдается резкий рост содержания CO в отработавших газах. Разница с выбросами CO на дизельном топливе при полной топливopодаче составляет для 2500мин⁻¹ — 23%, при 4000мин⁻¹ — 18,5%. Таким образом, можно сказать, что при работе на смесевых топливах уровни выбросов CO возрастают с увеличением доли ДМЭ в топливе. На средних и больших нагрузках причиной образования CO в основном является неполнота сгорания в переобогащенных топливом зонах топливовоздушной смеси. То есть, причины образования CO на этих нагрузках те же, что и у сажи. Соответственно, из-за уменьшения образования сажи при использовании топлива с добавкой ДМЭ при недостатке внешнего окислителя в переобогащенных зонах начинает усиливаться процесс образования окиси углерода, который не может быть окислен внутренним связанным кислородом молекул ДМЭ. На это указывает и то, что на режиме $n=2500\text{мин}^{-1}$ (максимального крутящего момента) уровень возрастания CO несколько выше, чем на $n=4000\text{мин}^{-1}$. При этом уровень снижения дымности ОГ имел противоположный характер. Рост содержания CO при малых нагрузках в основном можно объяснить относительно низкой температурой в камере сгорания. На рисунке 10 представлены относительные показатели работы дизеля на традиционном дизельном топливе и на смесевых топливах.

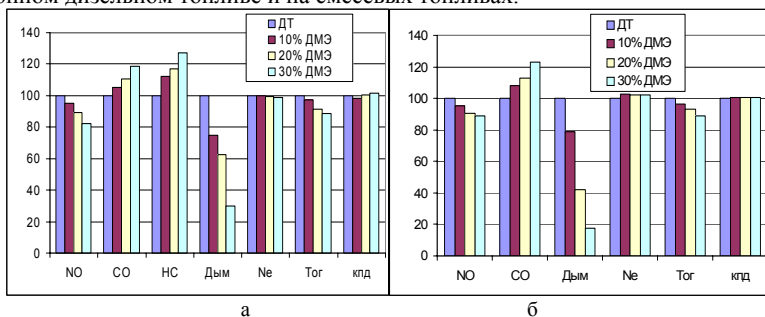


Рисунок 10 Сравнительные показатели дизельного двигателя при работе на дизельном топливе и смесевых топливах (а) $n=4000\text{мин}^{-1}$, б) $n=2500\text{мин}^{-1}$)

Изменение УОВ является простейшим средством воздействия на уровень токсичности вредных составляющих в ОГ. С уменьшением УОВ дымность ОГ и содержание CO в ОГ увеличивается, но при этом происходит снижение NO_x и CH в ОГ. Относительно низкие показатели дымности при добавке ДМЭ в ДТ позволяют организовать работу на меньших УОВ при некотором уменьшении мощностных и экономических показателей дизеля (по сравнению с оптимальным по мощности УОВ).

На рисунке 11 представлены относительные сравнительные показатели работы дизеля на ДТ (при оптимальном по номинальной мощности УОВ) и на топливе с 30% ДМЭ (на оптимальном по номинальной мощности УОВ — 10⁰ п.к.в. и уменьшенном УОВ — 7⁰ п.к.в.). Анализируя графики, можно сказать, что работа двигателя при использовании топлива с 30% ДМЭ на УОВ — 3⁰ п.к.в. от оптимального по мощности, позволяет при потере номинальной мощности и топливной экономичности в пределах 3-4% (от уровня ДТ) существенно снизить выбросы NO_x (30% — $n=4000\text{мин}^{-1}$; 40% — $n=2500\text{мин}^{-1}$ от уровня ДТ) при сохранении относительно низких уровней дымности. При этом концентрация углеродородов в ОГ приближается к уровню, характерному для ДТ. Однако, работа на меньшем УОВ привела к росту CO в ОГ. При УОВ — 3⁰ п.к.в. от оптимального по мощности уровень CO в ОГ превышал аналогичный показатель дизельного топлива на

30...40%. Таким образом, при наличии средств снижения концентрации СО в ОГ (нейтрализатор) можно рекомендовать при использовании смесевых топлив работу на меньших УОВ, в случаях, если необходимо снизить токсичность ОГ дизеля.

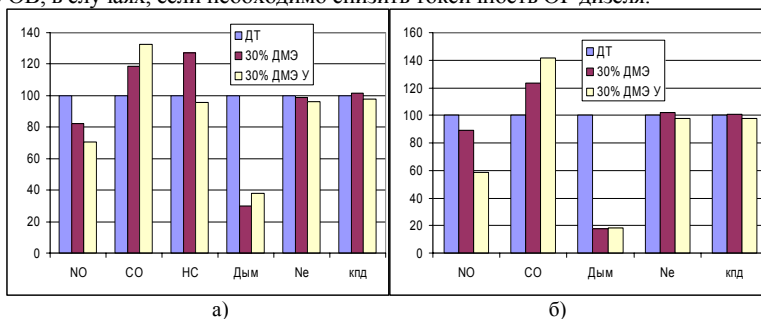


Рисунок 11 Сравнительные показатели дизельного двигателя при работе на дизельном топливе с 30% ДМЭ (а) $n=4000\text{мин}^{-1}$, б) $n=2500\text{мин}^{-1}$)

Для более полной оценки влияния добавки ДМЭ в дизельное топливо на эффективные показатели работы дизеля и на токсичность ОГ было проведено регрессионное моделирование. Были составлены регрессионные модели для максимальной мощности, удельного расхода топлива, температуры отработавших газов и токсичности ОГ. Модели создавались для режима полной топливоподачи при $n=4000\text{мин}^{-1}$ (режим близкий к номинальной мощности). Модели создавались для трех изменяемых факторов (доля ДМЭ в смеси; УОВ; давление начала впрыска). Созданные модели позволяют выбирать настройки топливной аппаратуры при различном составе смеси для достижения требуемых эффективных показателей двигателя или для получения требуемого уровня токсичности ОГ. Возможно и решение обратной задачи — выбор состава смеси при требуемых уровнях токсичности и эффективных показателях дизеля.

Моторные испытания проводились по методике планирования эксперимента. Был задействован полный факторный эксперимент 3^3 . Учитываемые факторы и интервалы варьирования представлены в таблице. Кодированные значения факторов (x_i) связанные с натуральными значениями вычислялись по соотношениям:

$$x_1 = \frac{\varphi - 20}{10}, \quad x_2 = \frac{\theta - 10}{3}, \quad x_3 = \frac{P_\phi - 14.5}{2.5}.$$

Таблица

Изменяемые факторы и уровни их изменения					
Фактор	Код фактора	Интервал	Уровень изменения		
			-1	0	1
% ДМЭ (φ)	x_1	10	10	20	30
θ , ° п.к.в.	x_2	3	7	10	13
P_ϕ , МПа	x_3	2,5	12	14,5	17

Коэффициенты регрессии определялись методом наименьших квадратов. Оценка значимости коэффициентов регрессии производится с помощью построения доверительного интервала для коэффициентов регрессии. Оценку адекватности представления результатов эксперимента математической моделью осуществляется с помощью критерия Фишера. Обработка экспериментальных данных и расчет коэффициентов регрессии производился на ПЭВМ с помощью пакета прикладных программ «STATISTICA 6.0». В результате обработки данных были найдены полиномиальные зависимости:

$$N_e(kBm) = 35,464 + 0,35x_1 + 0,612x_2 + 0,435x_3 - 0,545x_1x_2 - 1,404x_1x_3 - 1,074x_2^2 - 2,075x_3^2$$

$$\begin{aligned}
g_e(e/(kBm \text{ час})) &= 310.807 + 0.872x_1 - 13.381x_2 - 16.496x_3 + 1.996x_2x_3 - 4.508x_2^2 + 10.283x_3^2 \\
T_{or}(^{\circ}C) &= 594.009 - 31.546x_1 + 20.192x_2 - 38.974x_3 + 6.538x_1x_2 + 16.059x_2^2 - 7.852x_3^2 \\
NO_x(ppm) &= 304.35 - 19.061x_1 + 21.441x_2 - 29.113x_3 + 5.067x_1x_2 - 28.836x_1^2 + 12.452x_2^2 \\
D(e\delta.HSU) &= 26.526 - 13.816x_1 - 1.908x_2 - 4.12x_3 + 1.586x_1x_2 + 3.62x_1x_3 + 0.3x_2x_3 + 0.793x_1^2 + \\
&+ 0.643x_2^2 + 1.245x_3^2 - 0.314x_1x_2x_3. \\
CH(ppm) &= 162.384 + 23.219x_1 + 53.893x_2 - 32.145x_3 - 3.216x_1x_1 - 10.417x_1x_3 - 8.517x_2x_3 - \\
&5.097x_1^2 + 12.307x_2^2 - 17.813x_3^2. \\
CO(ppm) &= 1197.67 - 33.899x_1 - 223.002x_2 - 55.158x_3 - 41.67x_1x_2 + 4.936x_1x_3 + 9.1x_2x_3 + 17.758x_1^2 - \\
&115.749x_2^2 + 11.33x_3^2.
\end{aligned}$$

В качестве примеров на рисунках 12-15 даны графические интерпретации регрессионных моделей N_e , η_e , NO_x , D для топлив с фиксированным составом содержащих 10 и 30% ДМЭ ($\varphi=0,1$ и $\varphi=0,3$ соответственно).

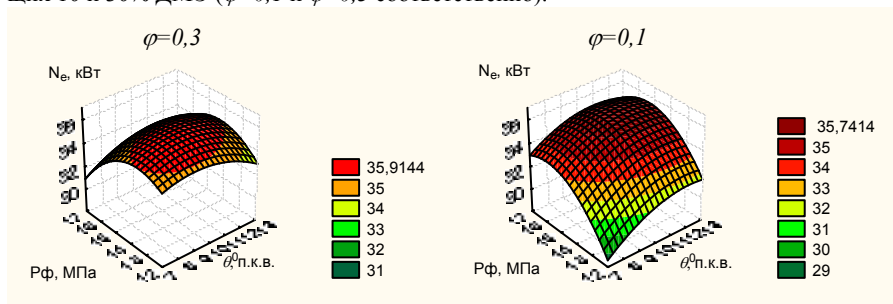


Рисунок 12 Зависимость N_e от УОВ и P_{ϕ}

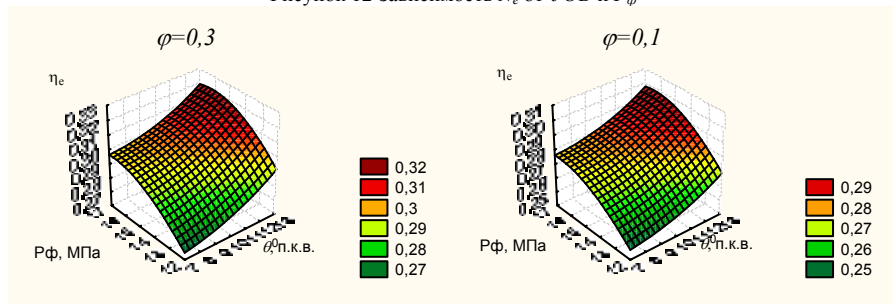


Рисунок 13 Зависимость η_e от УОВ и P_{ϕ}

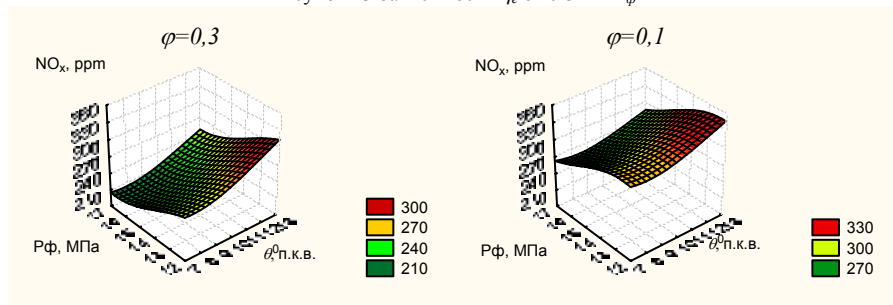


Рисунок 14 Зависимость выбросов NO_x от УОВ и P_{ϕ}

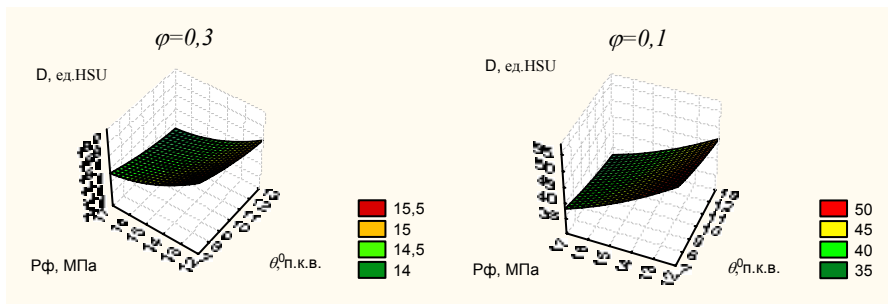


Рисунок 15 Зависимость дымности отработавших газов от УОВ и P_{ϕ}

На основании полученных регрессионных зависимостей и данных моторных испытаний определено влияние состава смеси на основные эффективные и токсические показатели данного дизеля (рисунок 16 (настройки ТА на ДТ)). Добавка ДМЭ в ДТ приводит к незначительному снижению эффективной мощности, но при этом экономические показатели несколько повышаются. Данная картина наблюдается для смесей с содержанием ДМЭ до 30% (включительно), далее происходит резкое снижение мощностных и экономических показателей дизеля. Таким образом, при данном способе использования ДМЭ целесообразно применение смесей с содержанием ДМЭ не более 30%. При этом с увеличением доли ДМЭ в топливе происходит снижение дымности отработавших газов и выбросов оксидов азота, что и предопределяет преимущества смесцевого топлива по сравнению с традиционным дизельным.

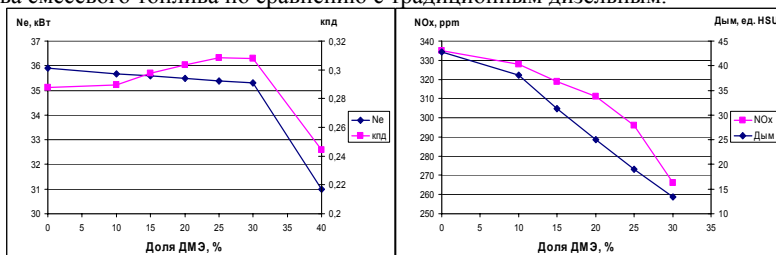


Рисунок 16 Влияние добавки ДМЭ на эффективные и экологические показатели дизеля

В целом данные регрессионные зависимости позволяют оценивать изменение основных эффективных показателей дизеля и его экологические характеристики в зависимости от состава смеси (доля ДМЭ в топливе) и от настроек топливной аппаратуры (θ и P_{ϕ}).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. Применение добавки ДМЭ в дизельное топливо является перспективным, так как позволяет снизить экологическое воздействие дизеля на окружающую среду и расширить сырьевую базу автомобильных топлив.
2. Представлена расчетно-экспериментальная методика по определению основных свойств смесевых топлив. Анализ полученных свойств смесей позволяет сделать вывод о возможности их применения в качестве топлива для дизеля с использованием традиционной системы топливоподачи непосредственного действия.
3. Смесей, содержащие до 35% ДМЭ, обладают достаточной стабильностью для их прак-

тического применения на автотранспорте. Стендовые безмоторные проливки ТНВД топливами различного состава позволили определить оптимальные давления подкачки, которые должны быть выше давлений насыщенных паров соответствующих смесей на 0,3-0,5 МПа.

4. Моторные испытания показали:

– Возможность использования смесей с содержанием ДМЭ до 30% (включительно) с сохранением основных эффективных показателей без значительной переделки двигателя. Изменение свойств смесового топлива можно скомпенсировать подбором регулировок топливной аппаратуры.

– Добавка ДМЭ снижает температуру отработавших газов во всем диапазоне нагрузочных и скоростных режимов (до 10%), что снижает тепловую напряженность силовой установки.

– Улучшаются экологические показатели дизеля с введением ДМЭ в топливо. Снижается дымность отработавших газов во всем диапазоне нагрузочных и скоростных режимов в 1,2...3 раза (соответственно 10 и 30% ДМЭ в смеси), снижается концентрация оксидов азота на 5...18% (при регулировках по оптимальной эффективной мощности).

– Работа дизеля на смеси с 30% ДМЭ при УОВ -3^0 п.к.в. от оптимального по мощности снижает NO_x на 29%, дымность на 62% (от уровня ДТ), CH соответствует уровню ДТ. Снижение мощности и экономичности наблюдается в пределах 3...4%.

5. Доработаны блоки математической модели рабочего процесса и образования токсичных веществ, учитывающие изменение физико-химических свойств топлива при добавке в него ДМЭ. Полученные регрессионные модели влияния добавки ДМЭ на основные эффективные и экологические показатели позволяют прогнозировать данные параметры дизеля в зависимости от состава смеси и регулировок топливной аппаратуры.

6. Для применения ДМЭ в качестве добавки к ДТ с системой топливоподачи непосредственного действия рекомендуется: Использовать смеси с содержанием ДМЭ до 30% (включительно); Обеспечить необходимые условия хранения и давления подкачки смесевых топлив; Организовать работу двигателя на меньших УОВ по сравнению с ДТ ($-1,5...-2^0$ п.к.в. от ДТ для смеси с 30% ДМЭ). При наличии средств снижения CO УОВ может быть еще уменьшен (до $-4,5...-5^0$ п.к.в. при 30% ДМЭ), что позволит снизить уровень NO_x , CH (до уровня ДТ), при сохранении низких показателей дымности. Снижение экономических характеристик наблюдается в пределах 3...4%.

7. Представленный способ применения ДМЭ улучшает экологическую безопасность дизеля; не снижает эксплуатационные показатели; не требует значительной модернизации двигателя; расширяет сырьевую базу автомобильных топлив.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Гвоздев А.М. Результаты испытания дизеля ВАЗ-341 на смеси дизельного топлива и диметилового эфира / В.А.Вагнер, А.М.Гвоздев // **Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер. Машиностроение**. Специальный выпуск «Двигатели внутреннего сгорания». -2007. С.157-162.

2. Гвоздев А.М. Улучшение экологических показателей дизеля путем добавки в топливо диметилового эфира / В.А.Вагнер, А.М.Гвоздев // **Ползуновский вестник**. - 2006. -№4. – С.33-38.

3. Гвоздев А.М. Применение добавки диметилового эфира к дизельному топливу для улучшения экологических показателей двигателя / В.А.Вагнер, А.М.Гвоздев //Материалы международной научно-практической конференции «Ресурсосберегающие технологии технического сервиса» Ч.1 / БГАУ. –Уфа, 2007. –С.72-76.

4. Гвоздев А.М. Использование диметилового эфира в качестве добавки к дизельному топливу / В.А.Вагнер, А.М.Гвоздев // Омский научный вестник. -2006. -№5 (39). –С.81-83.
5. Гвоздев А.М. Испытания дизеля ВАЗ-341 на топливе с добавкой ДМЭ / А.М.Гвоздев //Расчет, диагностика и повышение надежности элементов машин: межвузовский сборник научных трудов / Алт. гос.техн.ун-т им. И.И.Ползунова. –Барнаул, 2005. –Вып.6. –С.61-65.
6. Гвоздев А.М. К вопросу о влиянии угла начала подачи топлива на выбросы окислов азота дизелем при использовании в качестве топлива диметилового эфира / В.А.Вагнер, А.М.Гвоздев // Совершенствование машин, дизелей и теплоэнергетических установок: сборник научных трудов МГТУ-АлтГТУ / Алт.гос.техн.ун-т им. И.И.Ползунова. –Барнаул, 2000. –С.217-219.
7. Гвоздев А.М. Перспективы использования диметилового эфира (ДМЭ) в качестве моторного топлива / В.А.Вагнер, А.В.Вихарев, А.М.Гвоздев // Совершенствование машин, дизелей и теплоэнергетических установок: сборник научных трудов МГТУ-АлтГТУ / Алт.гос.техн.ун-т им. И.И.Ползунова. –Барнаул, 2000. –С.219-223.
8. Гвоздев А.М. Снижение эмиссии окислов азота при использовании в дизеле диметилового эфира / В.А.Вагнер, А.М.Гвоздев, И.М.Ковалев //Расчет, диагностика и повышение надежности элементов машин: межвузовский сборник научных трудов / Алт.гос.техн.ун-т им. И.И.Ползунова. –Барнаул, 2000. –Вып.2. –С.22-27.
9. Гвоздев А.М. Причины отсутствия сажи в отработавших газах дизелей, работающих на диметиловом эфире/В.А.Вагнер, А.М.Гвоздев, С.В.Шаповалова //Расчет, диагностика и повышение надежности элементов машин: межвузовский сборник научных трудов / Алт. гос.техн.ун-т им. И.И.Ползунова. –Барнаул, 2000. –Вып.2. –С.27-31.