

колоне вала, что согласуется с экспериментальными данными других типов двигателей.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Двигатели внутреннего сгорания. Конструирование и расчёт на прочность поршневых и комбинированных двигателей. Под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. М.: Машиностроение, 1984 г, 384 с.

2. Чайнов Н.Д., Краснокутский А.Н., Карпов А.В. Расчеты нагрузок в элементах КШМ и прочности коленчатых валов поршневых машин. Учебное пособие. Изд. МГТУ им. Баумана, 2000, 32 с.

3. Совершенствование основных узлов турбопоршневых двигателей. Под ред. А.С. Орлина. М.: Машиностроение, 1974г. - 207 с.

4. Лейкин А.С. Напряженность и выносливость деталей сложной конфигурации. М.: Машиностроение, 1968, 371 с.

### ПРИМЕНЕНИЕ СМЕСЕЙ ДИМЕТИЛОВОГО ЭФИРА И ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА В КАЧЕСТВЕ АЛЬТЕРНАТИВНОГО ТОПЛИВА ДЛЯ ДИЗЕЛЬНОГО АВТОТРАНСПОРТА

**Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Жердев А.А., Рогов В.С.,  
Калинин Д.Н., Борисенко Н.Е.**

*МГТУ им. Н.Э.Баумана, г. Москва*

Автотранспорт является одним из крупнейших загрязнителей окружающей среды. В масштабах Российской Федерации его доля в суммарных выбросах загрязняющих веществ в атмосферу всеми техногенными источниками достигает в среднем 43%, в выбросах «климатических» газов — около 10%, в массе промышленных отходов — 2%, в сбросах вредных веществ со сточными водами — около 3%, в потреблении озоноразрушающих веществ — не более 5%. Доля автотранспорта в загрязнении атмосферного воздуха Москвы достигает 80% [1].

Основную массу выбросов вредных веществ от автотранспорта составляют: оксид углерода, углеводороды и оксиды азота. Для здоровья населения наибольшую опасность представляют выбросы канцерогенных веществ  $\text{NO}_x$ , а также: сажа, бензол, свинец, 1,3-бутадиен и опасных органических веществ (формальдегида, акролеина, толуола, ксилола).

В структуре ущерба окружающей среде и здоровью населения от выбросов автотранспорта в городах девять веществ определяют 95% суммарного ущерба: оксиды азота (44,5%), свинец (21%), акролеин (7,5%), сажа (7,4%), оксид углерода (6%), диоксид серы (3,4%), формальдегид (2,8%), бенз(а)пирен (1,3%), ацетальдегид (1,1%) [2].

Известны несколько путей улучшения экологических ДВС. К ним относятся совершенствование конструкции и способов управления ДВС, в частности, совершенствование систем топливоподачи, газораспределения,

улучшение смесеобразования, применение рециркуляции отработавших газов (ОГ) и др. Эффективна нейтрализация вредных компонентов ОГ в выпускной системе. Затягивание введения экологических норм Euro-II с 1999 до 2005 года, и, возможно и далее, провоцируют выпуск неэкологических двигателей и тормозит прогресс в двигателестроении. С другой стороны проблемы, связанные с автомобилизацией входят в жёсткое противоречие с отсталым экологическим законодательством. В частности, это противоречие вынудило правительство Москвы, не дожидаясь принятия новых нормативов на токсичность ОГ автомобилей, предпринять ряд мер не только организационного, но чисто технического характера.

Одним из путей снижения негативного влияния автомобиля на экологию города является использование альтернативных, экологически более чистых видов моторного топлива. Интенсивные работы в этом направлении ведутся во всех развитых странах мира. Одним из наиболее перспективных альтернативных топлив для дизелей является диметиловый эфир (ДМЭ), который производят путём синтеза из природного газа.

ДМЭ известен как хладагент для первых холодильных установок и был вытеснен аммиаком, а позднее фреонами. В последнее время возобновляется интерес к ДМЭ, как хладагенту ввиду отсутствия, в отличие от фреонов, озоноразрушающих свойств.

Применение ДМЭ позволяет снизить содержание вредных веществ в ОГ до норм Euro-III без использования нейтрализаторов, как на вновь выпускаемых автомобилях, так и на находящихся в эксплуатации. Наличие больших запасов природного газа в России, являющегося сырьем для получения ДМЭ при массовом производстве, позволит сделать его использование экономически выгодным.

Свойства ДМЭ как моторного топлива существенно отличаются от дизельного (ДТ) (табл. 1) [3,4,5]. Например, с учетом более низкой плотности и теплотворной способности для сохранения мощности дизеля необходимы в  $1,7 \div 1,9$  раза большие объемные цикловые подачи. При проектировании топливного насоса высокого давления (ТНВД) приходится учитывать, что в силу значительно большей сжимаемости ДМЭ, необходимо увеличивать запас по объемной производительности на номинальном режиме в  $2,4 \dots 2,7$  раза. Топливоподача и рабочий процесс дизеля при переходе с дизельного топлива на ДМЭ претерпевают значительные изменения (табл. 2). В результате повышенной сжимаемости ДМЭ подача начинается позднее. Оптимальный угол опережения с повышением частоты вращения вала растет, а действительный уменьшается. Это противоречие тем сильнее, чем больше сжимаемость топлива. Поэтому автоматическая муфта опережения должна быть сконструирована специально под работу на ДМЭ. Со стандартной муфтой работа дизеля неоптимальна, тем более без нее. Этот дефект компенсируется более быстрым воспламенением ДМЭ.

Таблица 1. Сравнение важнейших топливных свойств ДМЭ и ДТ.

Наименование показателя	ДМЭ	ДТ	Пропан
Химическая формула	СН <sub>3</sub> -О-СН <sub>3</sub>	С <sub>x</sub> Н <sub>y</sub> (С <sub>n</sub> Н <sub>1.8n</sub> )	С <sub>3</sub> Н <sub>8</sub>
Молярная масса	46,07	190...220	44,01
Плотность жидкой фазы при 20 <sup>0</sup> С, кг/м <sup>3</sup>	668	831...840	501
Температура кипения, <sup>0</sup> С	-24	180...371	-43
Низшая теплота сгорания, МДж/кг	28,8	42,7	46,3
Давление насыщенных паров (20 <sup>0</sup> С), кПа	530	< 0,001	840
Температура самовоспламенения, <sup>0</sup> С	235	250	470
Цетановое число	55...60	40...55	<10
Стехиометрическое соотношение	9,0	14,6	15,6
Кинематическая вязкость, мм <sup>2</sup> /с	3	0,12	0,10
Коэффициент сжимаемости при 20 <sup>0</sup> С и 0,1 МПа, 1/МПа	210·10 <sup>-11</sup>	86·10 <sup>-11</sup>	230·10 <sup>-11</sup>
Содержание элементов, по массе %:			
- углерод	52,2	87	82
-водород	13,0	13	18
-кислород	34,8	0	0

Таблица 2. Показатели впрыскивания топлива в дизель Д245.12С

Показатели подачи	ДТ	ДМЭ	90% ДТ+ 10%ДМЭ
Цикловая подача, мг	79	118	82,7
Активный ход плунжера, мм.	2,15	5,56	2,56
Величина подвпрыскивания, % от g <sub>ц</sub>	0	1,2	0
Максимальное давление перед форсункой, МПа	55,09	38,38	55,08
Максимальное давление впрыскивания, МПа	44,36	28,79	42,66
Среднее давление впрыскивания, МПа	23,95	19,56	23,93
Продолжительность подачи, град. повор. колен. вала	23,12	44,12	24,40
Запаздывание начала подачи, град. повор. колен. вала	11,60	22,32	12,90
Максимальный момент на кулачковом валу, Н·м	92,00	66,56	85,18

Другим значительным изменением подачи топлива является снижение давления впрыскивания. Этому не воспрепятствовало даже увеличение объемной цикловой подачи. Однако, это, если и не соответствует оптимальным условиям смесеобразования, то, по крайней мере, не является лимитирующим фактором: за счет меньшего поверхностного натяжения и вязкости легче обеспечивается распыливание жидкой струи ДМЭ, при температурах заряда в цилиндре эфир без видимой задержки испаряется. Важнее то, что возрастает продолжительность впрыскивания на номинальном режиме. Если за счет особых качеств ДМЭ удастся избежать дымности ОГ, то затягивание впрыскивания не позволяет улучшить экономичность дизеля. Предлагаемый выход из положения — увеличение сечения сопел распылителя, как и снижение давления впрыскивания — не соответствует возможностям универсального двухтопливного дизеля.

Возникают и другие специфические проблемы при питании дизеля чистым ДМЭ. Ухудшается наполнение плунжерной полости, в результате возрастает нестабильность подачи. Использование ДМЭ без импортной присадки Lubrizol, ввиду непривычно малой вязкости создает проблемы долговечности прецизионных пар. Затруднена подкачка топлива в линии низкого давления. Более короткая и широкая топливная струя приводит к перераспределению тепловых нагрузок на детали цилиндропоршневой группы, перегреву деталей центральной части камеры сгорания и др.

Становится совершенно очевидным, что для эффективной работы дизеля на ДМЭ необходимо заново проводить оптимизацию рабочего процесса. Но и в этом случае создание универсального двухтопливного дизеля на базе существующих технических решений все же остается проблематичным. Результаты такого подхода хорошо известны из 50-летнего опыта создания универсального двигателя с принудительным зажиганием на бензине и газе. Кроме того, структура современного товарного рынка моторных топлив и заправочных станций требует серьезных изменений для эксплуатации специализированного автомобиля на ДМЭ.

Наиболее обнадеживающим выходом из этой ситуации может быть создание нового поколения транспортных дизелей, использующих компромиссные технические решения, касающиеся механических элементов двигателя и системы электронного управления, оптимизирующей протекание рабочего процесса. На дальнюю перспективу целесообразно рассматривать систему с электронным управлением подачи топлива, типа Common Rail, а более близкую – топливную аппаратуру, базирующуюся на ныне выпускаемой, оснащенной системой электроклапанного управления подачей.

Пока же в МГТУ разработана и реализована система подачи ДМЭ в смеси с ДТ, базирующаяся на доработанной серийной. Процесс подачи ДМЭ и образование смесового топлива осуществляется по следующему принципу (рис. 1): ДМЭ из бака подается к двигателю под давлением 1,0...1,5 МПа, создаваемое сжатым азотом. Наддув азотом баллона с эфиром позволяет сохранить мало меняющееся давление по мере потребления ДМЭ, а также исключить вероятность образования паровых пробок, особенно в объеме подкапотного пространства. Кроме этого, безнасосная схема подачи ДМЭ соответствует требованиям противопожарной безопасности при температуре ниже  $-26^{\circ}\text{C}$ , когда давление насыщенных паров ДМЭ становится ниже атмосферного, что не исключает вероятность попадания в баллон атмосферного воздуха.

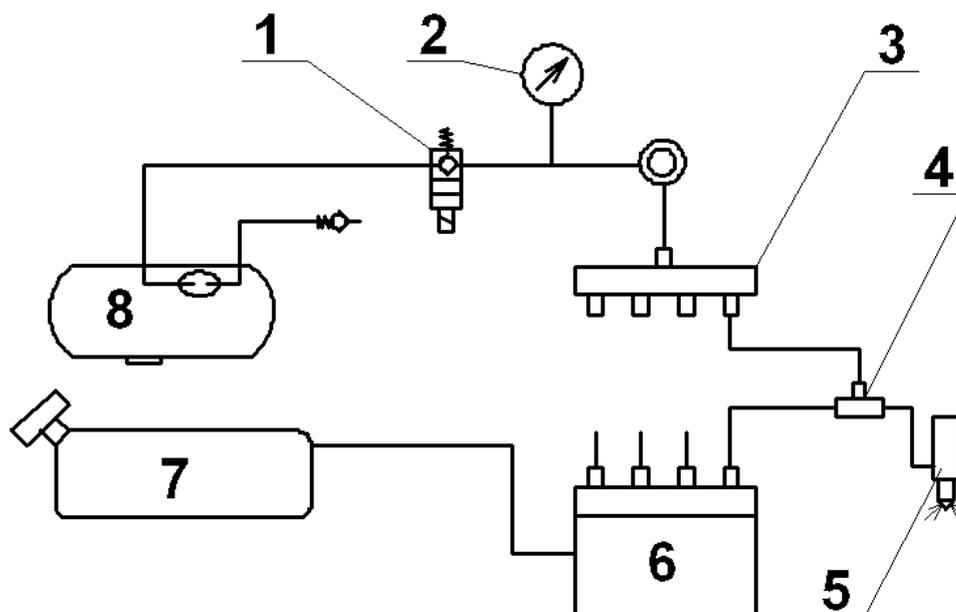


Рис. 1. Схема топливной системы автомобиля МГТУ: 1 – электроуправляемый клапан; 2 – манометр; 3 – рампа; 4 – клапан импульсной подпитки; 5 – форсунка; 6 – ТНВД; 7 – бак для ДТ; 8 – баллон с ДМЭ

Пройдя электромагнитный клапан отсечки подачи топлива, ДМЭ поступает к топливной рампе и далее к клапанам импульсной подпитки. Через них происходит многократное всасывание ДМЭ в трубопроводы высокого давления в условиях затухающего волнового процесса после окончания впрыскивания. Схема подачи ДМЭ в линию высокого давления с помощью клапанов импульсной подпитки, был предложен и апробирован для подачи сжиженных газов проф. РУДН Н.Н. Патрахальцевым. Именно с их помощью в лабораториях РУДН, МГТУ, Алт. ГТУ удавалось подавать в линию высокого давления различные топлива, включая вязкие суспензии, водород и т.д.

Оптимальное содержание ДМЭ в смеси обуславливается достигаемыми экологическими показателями и стоимостью ДМЭ. Оба фактора подвержены сильным колебаниям. Так, в течение года стоимость ДМЭ в Москве повысилась в 5,3 раза, достигнув 800 \$/Т. На период 2004-2005 г оптимальным содержанием ДМЭ признано 30% по объёму (25% по массе).

Проведена серия ходовых испытаний экспериментального автомобиля-рефрижератора ЗИЛ-47303А "Бычок" принадлежащего МГТУ и еще 10 автомобилей-рефрижераторов ЗИЛ-47303А "Бычок", предоставленных ГУП «Мосавтохолод» при финансовой поддержке МКНТ и Управления транспорта и связи Правительства г. Москвы, работающих на смесевом топливе.

Пробег экспериментального автомобиля МГТУ (рис. 2) за время испытания составил около 1300 км, из них около 50% автомобиль передвигался по улицам города. Средняя скорость автомобиля при движении за

городом составила 70 км/ч, а при движении по улицам города приблизительно 30 км/ч.



Рис. 2. Экспериментальный автомобиль МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Путевой расход дизельного топлива при движении в городском цикле составил примерно 17 л/100 км, при движении за городом около 13 л/100 км. Путевой расход ДМЭ при движении за городом составил примерно 8 л/100 км, что с учётом более низкой плотности и теплотворной способности ДМЭ по сравнению с ДТ эквивалентно 4 л/100 км ДТ. При этом путевой расход ДТ составил около 9 л/100 км.

Таким образом, приведённый с учётом более низкой плотности и теплотворной способности ДМЭ суммарный расход смесового топлива составил примерно 13 л/100 км. Расход ДМЭ в городском цикле не оценивался из-за небольших длин поездок.

Согласно «Нормам расхода топлив и смазочных материалов на автомобильном транспорте» базовая норма расхода дизельного топлива для автомобиля ЗИЛ-5301 «Бычок» составляет около 14 л/100 км, а при эксплуатации автомобиля в городах с населением свыше 2,5 млн. человек, норма повышается до 20%, при пробеге первой тысячи километров новым автомобилем – до 10%, при использовании холодильной установки - до 5%.

Таким образом, предельное значение нормы расхода дизельного топлива для автомобиля ЗИЛ-5301 «Бычок» составляет: при работе в городе примерно 18 л/100 км, а при работе за городом около 17 л/100 км.

Как видно из приведённых выше цифр, экспериментальный автомобиль соответствует установленным нормам расхода топлива.

На протяжении всего срока эксплуатации экспериментального автомобиля, периодически брались пробы ОГ дизеля в лаборатории МГТУ им.

Н.Э. Баумана для определения содержания вредных веществ. Выявлено снижение дымности ОГ при переходе с дизельного на бинарное топливо (рис.3). Снижения дымности удастся достичь за счет высокого содержания кислорода в молекуле —  $\text{CH}_3\text{-O-CH}_3$ .

Наличие кислорода в молекуле эфира углеродо-углеродные связи и обуславливает необходимость меньшего количества атмосферного кислорода при сгорании, улучшает сгорание в условиях дефицита воздуха. Немаловажную роль в снижении дымности играет повышенная испаряемость ДМЭ. Под действием высоких температур, легкокипящая фракция ДМЭ способствует разрушению капель, улучшая гомогенность смеси, увеличивая полноту сгорания и снижая дымность ОГ.

Были проведены контрольные испытания автомобиля-рефрижератора ЗИЛ-47303А "Бычок", работающего на смесевом топливе, по типовым методикам на ГУП "НИЦИАМТ".

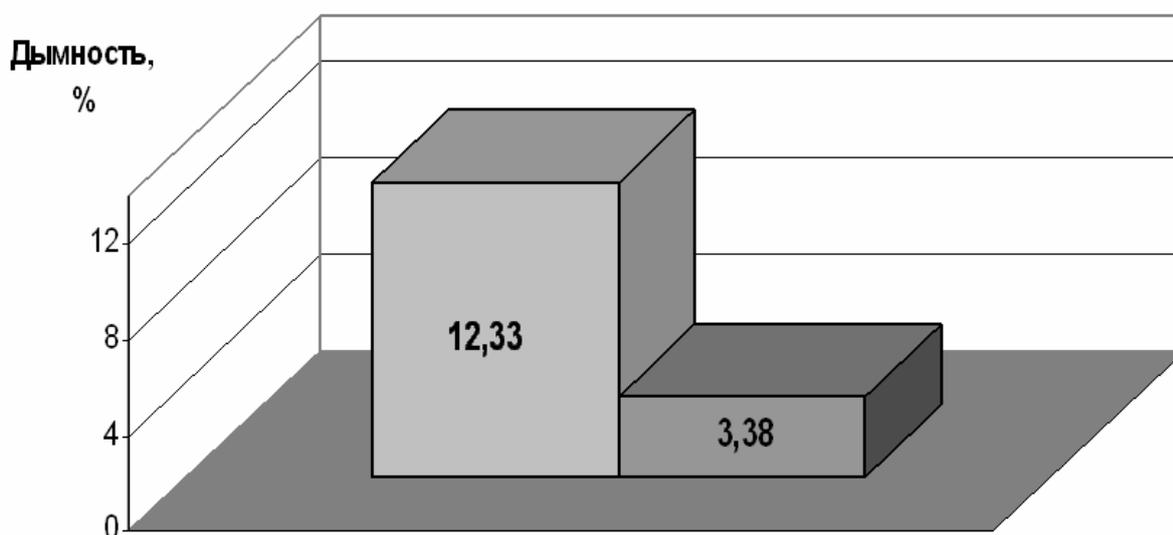


Рис.3 Дымность отработавших газов на режиме максимальной частоты вращения.

На основании испытаний, проведенных в ГУП "НИЦИАМТ, сделаны следующие выводы:

- содержание вредных веществ в кабине автомобиля не превышает нормативов ГОСТ Р 51206 на содержание окиси углерода, суммарного количества углеводородов, окислов азота и акролеина;
- выявлено сохранение или улучшение экономических показателей автомобиля на смесевом топливе;
- обнаружена необходимость более строгого контроля регулировки автоматического регулятора для сохранения мощностных, а, следовательно, и скоростных показателей автомобиля.

Питание смесевым топливом позволяет не только снизить токсичность ОГ, улучшить экономические показатели, но и уменьшить шумность работы дизеля ввиду большего значения цетанового числа ДМЭ в сравне-

ние с ДТ. За счет подачи ДТ как основного компонента смесового топлива, удается сохранить высокое давление и малую продолжительность впрыскивания, оставить в качестве основы серийную топливную аппаратуру и обеспечить простоту перехода на чистое ДТ, а также увеличить суммарный пробег автомобиля без заправки. Кроме того, ввиду малой трудоемкости и невысокой стоимости специализированной аппаратуры удается сохранить низкую стоимость автомобиля и ускорить обновление находящегося в эксплуатации парка автомобилей.

Необходимо также отметить схожесть свойств ДМЭ и сжиженного нефтяного газа — пропана, что позволяет при минимальных доработках использовать существующую систему газозаправочных станций и отчасти выпускаемую газовую аппаратуру. В нашем случае применялось газобаллонное оборудование московской фирмы САГА.

Система питания дизеля смесовым топливом отличается дешевизной от питания чистым ДМЭ доступностью, универсальностью, эффективностью, не требует решения специфических проблем, возникающих при использовании чистого ДМЭ и, очевидно, является наиболее приемлемой в настоящее время.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Антифеев В.Н., Ровнер Г.М., Мкртычан Я.С. О новой московской программе использования альтернативных видов моторного топлива на автотранспорте // Автогазозаправочный комплекс. — 2002, №4, с. 8-17.
2. Плечов А.Л. Вопросы экологической безопасности // Легковое и грузовое автохозяйство — 2001, №5, с.40-44.
3. Ofner H., Tritthart P A Fuel injection system concept for dimethyl ether. C517/022/96/. AVL LIST GmbH, Gras, Australia, 1996. p.275-288.
4. Kapus P., Ofner H. Development of Fuel Injection Equipment and Combustion for DI Diesels Operated on Dimethyl Ether // SAE Paper 950062, 1995. 18 p.
5. Sorenson S. C., Svend-Erik Mikkelsen Performace and Emissions of 0.273 Liter Direct Injection Diesel Engine Fuelled with Neat dimethyl Ether // SAE Paper 950064, 1995 . 11 p.