

ПРИМЕНЕНИЕ ДИМЕТИЛОВОГО ЭФИРА В КАЧЕСТВЕ ТОПЛИВА И ХЛАДОАГЕНТА ДЛЯ ГОРОДСКИХ АВТОМОБИЛЕЙ

А.М. Архаров, С.Д. Глухов, Л.В. Грехов, А.А. Жердев,
Н.А. Иващенко, Д.Н. Калинин

Рассматривается проблема генерации энергии и холода на транспортных средствах, имеющая огромное значение для мегаполисов, крупных городов и густонаселенных регионов. В таких центрах сосредоточились важнейшие технические и технологические достижения двадцатого столетия: двигателестроение, автомобилестроение, химическое машиностроение, атомное машиностроение и энергетика, электроэнергетика, холодильная и криогенная техника, пищевые технологии, аэрокосмические и химические комплексы и многое другое.

Процесс насыщения таких регионов новейшими техническими решениями и средствами транспортировки пассажиров и грузов будет несомненно усиливаться. Ряд крупнейших мегаполисов мира (например, Лос-Анджелес, Токио, Лондон, Шанхай) были вынуждены принять жесткие ограничения, касающиеся, в первую очередь, транспортных средств, систем охлаждения, отопления, фильтрации, очистки, а также регламентировать свойства рабочих веществ многих энергосиловых и холодильных установок и различных потребительских товаров.

В 1987 году был подписан так называемый Монреальский протокол, запрещающий производство озоноразрушающих хладагентов, а в 1997 году разработан Киотский протокол, направленный на существенные ограничения использования веществ, стимулирующих парниковый эффект нашей планеты. Кроме этого с 2003 года в России введены нормы Euro-II, регламентирующие содержание токсичных веществ в отработанных газах двигателей внутреннего сгорания.

Сегодня существуют два критерия:

- ODP (потенциал озоноразрушения в атмосфере);
- GWP (потенциал глобального потепления).

В идеале для используемых рабочих веществ и топлив они должны иметь нулевые значения.

К таким, в принципе, немногочисленным веществам относится простое и известное вещество ($\text{CH}_3\text{-O-CH}_3$) - диметилловый эфир

(ДМЭ), которое по этому и ряду других признаков заслуживает серьезного к себе внимания как к топливу и хладагенту. ДМЭ использовался в первых парокомпрессионных холодильных машинах и был вытеснен аммиаком и позднее фреонами. В последние годы ДМЭ рассматривается и как перспективное топливо для транспортных дизелей, в первую очередь, благодаря возможности значительного снижения выбросов вредных веществ с отработавшими газами (Euro-III без использования нейтрализаторов). Эти качества ДМЭ являются объективными предпосылками создания комбинированных энергетических установок городского транспорта, включающих двигатель и холодильный агрегат. Ниже приведены результаты исследований ДМЭ как компонента дизельного топлива и хладагента, выполненные в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Часть 1. ДМЭ как моторное топливо

Свойства ДМЭ как моторного топлива существенно отличаются от дизельного (табл. 1). Например, с учетом более низкой плотности и теплотворной способности для сохранения мощности дизеля необходимы в 1,7÷1,9 раза большие объемные цикловые подачи. При проектировании топливного насоса высокого давления приходится учитывать, что в силу значительно большей сжимаемости ДМЭ, необходимо увеличивать запас по объемной производительности на номинальном режиме в 2,4 ...2,7 раза. Топливоподача и рабочий процесс дизеля при переходе с дизельного топлива (ДТ) на ДМЭ претерпевают значительные изменения. В результате повышенной сжимаемости ДМЭ подача начинается позднее. Так, в дизеле Д245.12 (4ЧН10,5/12) на автомобиле "Бычок", для которого создавалась модернизированная топливная аппаратура, при переходе на ДМЭ на номинальном режиме опережение впрыскивания уменьшалось на 10,7 градусов поворота коленчатого вала (табл. 2). 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 не оптимальна, тем более без нее (как на дизеле Д245.12). Этот дефект компенсируется более быстрым воспламенением ДМЭ. Приведенные в табл. 2 результа-

ты получены с помощью программного комплекса "Впрыск", адаптированного под исследуемый объект. С его помощью производилась оптимизация и проектирование усовершенствованной топливной системы для подачи ДМЭ.

Таблица 1. Сравнение важнейших топливных свойств ДМЭ и ДТ

Свойства	ДТ	ДМЭ
Плотность при 20 °С, кг/м ³	835 ...850	668
Вязкость кинематическая при 20 °С, мм ² /с	3...4	0,1...0,3
Теплота сгорания, МДж/кг	43,5	28,8
Стехиометрическое соотношение	14,5	9
Молекулярная масса	~ 170	46,07
Температура самовоспламенения, °С	240-310	235
Теплота парообразования при 20 °С, кДж/кг/К	210	410
Цетановое число	45	> 55
Содержание кислорода, %	0,4	34,8
Давление насыщенных паров при 20 °С, МПа	< 0,001	0,51
Критическое давление МПа/К	-	5,37/400
Коэффициент сжимаемости 20 °С и 0,1 МПа, 1/МПа	86·10 ⁻¹¹	210·10 ⁻¹¹

Таблица 2. Показатели впрыскивания топлива в дизель Д245.12

Свойства	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_c	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. поворота коленч. вала	23,12	44,12	24,40
Запаздывание начала подачи, град. поворота коленч. вала	11,60	22,32	12,90
Максимальный момент на кулачковом валу, Н·м	92,00	66,56	85,18

Другим значительным изменением показателя подачи топлива является снижение давления впрыскивания (в дизеле Д245.12 в 1,5 раза). Этому не воспрепятствовало даже увеличение 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 ДМЭ без видимой задержки испаряется. Важнее то, что возрастает продолжительность впрыскивания на номинальном режиме на 11 градусов (табл. 2). Если за счет особых качеств ДМЭ удастся избежать дымности отработавших газов, то затягивание впрыскивания экономичность дизеля улучшить не позволяет. Предлагаемый выход из положения - увеличение сечения сопел распылителя - противоречит концепции универсального двухтопливного дизеля.

ПРИМЕНЕНИЕ ДИМЕТИЛОВОГО ЭФИРА В КАЧЕСТВЕ ТОПЛИВА И ХЛАДОАГЕНТА ДЛЯ ГОРОДСКИХ АВТОМОБИЛЕЙ

Возникают и другие специфические проблемы при питании дизеля ДМЭ. Ухудшается наполнение плунжерной полости, в результате возрастает нестабильность подачи. ДМЭ без импортной присадки "Lubrizol", ввиду непривычно малой вязкости, создает проблемы запуска дизеля, утечек и долговечности прецизионных пар, подкачки топлива в линии низкого давления. Более короткий и широкий факел 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. Если же такая работа и будет проведена, то 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 потребует 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. В отношении системы топливоподачи, требующей наибольших изменений в соответствии с новыми условиями работы, то здесь наиболее перспективным является применение аккумуляторной системы с электронным управлением "Common-Rail".

Приходится констатировать, что к началу XXI столетия в России не выпускается ни одного серийного дизеля с электронной системой управления (кроме электронного регулятора мелкосерийного дизеля ГАЗ-560). Более того, нет оснований говорить о скором начале производства "Common-Rail". Недостаточная изученность гидродинамических и теплофизических особенностей поведения ДМЭ в условиях быстропротекающего при высоких перепадах давлений и физико-химических процессах смесеобразования и сгорания сдерживают создание дизеля с эффективным рабочим процессом. Вместе с тем требования к экологии крупных городов заставляют искать пути улучшения ситуации на

базе выпускаемой и находящейся в эксплуатации техники. В этой связи безусловно конструктивным является предложение об изменении структуры топливного рынка в пользу ДМЭ (Постановление Правительства Москвы № 170-ПП от 12.03.2002 г.).

Положительные результаты имел опыт организации процесса в дизелях семейства 4Ч0,5/12 с подачей сжиженных газов в цилиндр через усовершенствованную топливоподающую аппаратуру. Имеется опыт безнасосной подпитки линии высокого давления другими альтернативными топливами: водородом, газами, густой угольной суспензией и пр. В частности, результаты опытов МГТУ-ЗИЛ на дизеле ЗИЛ-645 с подачей в линию высокого давления газов показательны и в другом отношении. Снижение на 20 ...45 % CH_4 , CO и NO_x регистрировалось при подаче водорода, синтез-газа и чистого воздуха. Присадки воздуха оказались не намного хуже водорода: улучшение процесса было следствием физических факторов смесеобразования.

На основании изложенного и имеющегося опыта нами предлагается осуществить внедрение экологически более чистого топлива ДМЭ в смеси с традиционным дизельным топливом. Его доля должна составлять для различных моделей дизелей и режимов работы от 10 до 40 %. При этом будут сглажены или отсутствовать многие специфические проблемы питания дизеля чистым ДМЭ. Протекание рабочих процессов улучшится (распыливание, испарение, воспламенение, сгорание), уменьшение выбросов вредных веществ позволит обеспечить законодательные нормы ближайшей перспективы даже на относительно старых моделях дизелей доступными техническими средствами.

Для этой цели была спроектирована и отработана система топливоподачи транспортного дизеля (рис. 1).

Концепция улучшения эксплуатируемых ныне дизелей питанием смесевым топливом с добавками ДМЭ позволяет достигнуть следующих результатов:

- за счет большого цетанового числа обеспечить меньшую шумность работы, облегченный пуск и уменьшение выбросов окислов азота;
- за счет высокого содержания кислорода в ДМЭ и улучшения распыливания смесевого топлива, содержащего легкокипящий компонент, обеспечить снижение дымности отработавших газов;
- за счет подачи ДТ как основного компонента смесевого топлива сохранить высокое

давление и малую продолжительность впрыскивания, малый расход ДМЭ, сохранить базовую топливную аппаратуру и обеспечить практическую простоту перехода на чистое ДТ;

- за счет недорогой модернизации топливной аппаратуры сохранить низкую стоимость автомобиля и ускорить обновление находящегося в эксплуатации парка автомобилей;

- за счет меньшего расхода более дорогого ДМЭ в смесевом топливе в сравнении с

технологией сжигания чистого ДМЭ (его стоимость при нынешнем и перспективном объеме производства колеблется в интервале 10...20 руб/кг), а также за счет сохранения штатного ресурса топливной аппаратуры, за расчетный пробег в 250 тыс. км экономический эффект составляет от 166 до 523 тыс. руб, т.е. от 0,4 до 1,5 стоимости автомобиля с термокузовом.

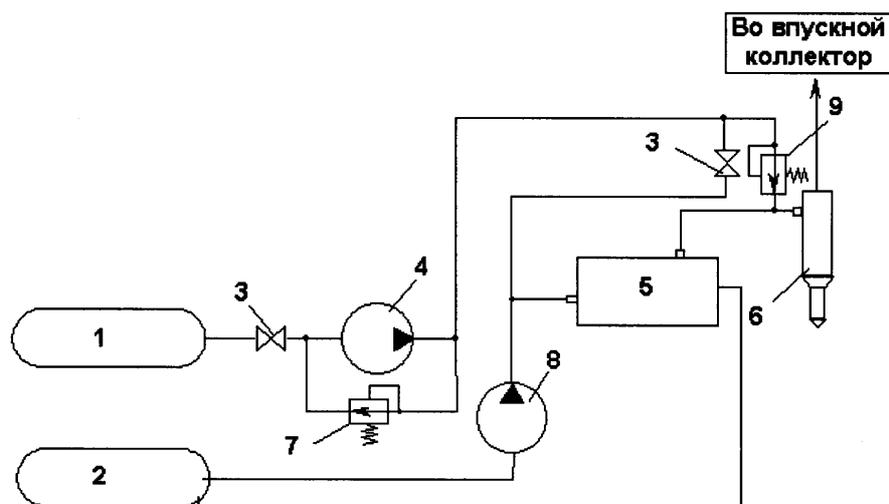


Рис. 1. Система топливоподачи транспортного дизеля

Кроме того, при применении смеси дизельного топлива и ДМЭ отпадает необходимость использования дорогостоящих импортных присадок, а малый расход ДМЭ облегчает эксплуатацию автомобилей, делает целесообразным создание комбинированных установок с питанием ДМЭ холодильного агрегата и дизеля.

Предлагаемое решение, по нашему мнению, отличается дешевизной, доступностью, универсальностью, эффективностью и не требует решения специфических проблем, возникающих при использовании чистого ДМЭ. Тем не менее, сохраняется необходимость продолжения исследования и поиска новых технических решений.

Часть 2. ДМЭ как хладагент

Характеристик первых холодильных машин, работавших на ДМЭ, за давностью обнаружить не удалось, поэтому вначале была создана компьютерная программа для определения термодинамических свойств ДМЭ, по-

строены диаграммы (рис. 2) и рассчитаны теоретические характеристики пароконденсационных холодильных машин на ДМЭ (рис. 3 и 4).

В лаборатории малых холодильных машин МГТУ им. Н.Э.Баумана проведены испытания серийно выпускаемого холодильника "Стинол 106" на ДМЭ. Без каких-либо переделок и замены масла был заменен хладон R12 на ДМЭ и определена оптимальная величина его заправки. Суточный расход энергии при различных массах заправки ДМЭ представлен на рис. 5. Пунктирная линия на рисунках показывает величину суточной потребляемой энергии холодильника "Стинол 106" на R12 (паспортная масса заправки 240 г). Испытания показали, что оптимальная масса заправки ДМЭ для данной модели холодильника (без изменения размеров капиллярной трубки) составляет 60 ...70 г. При этом зафиксировано снижение суточного расхода электроэнергии (14 ...16 %) при прочих неизменных параметрах.

ПРИМЕНЕНИЕ ДИМЕТИЛОВОГО ЭФИРА В КАЧЕСТВЕ ТОПЛИВА И ХЛАДОАГЕНТА
ДЛЯ ГОРОДСКИХ АВТОМОБИЛЕЙ

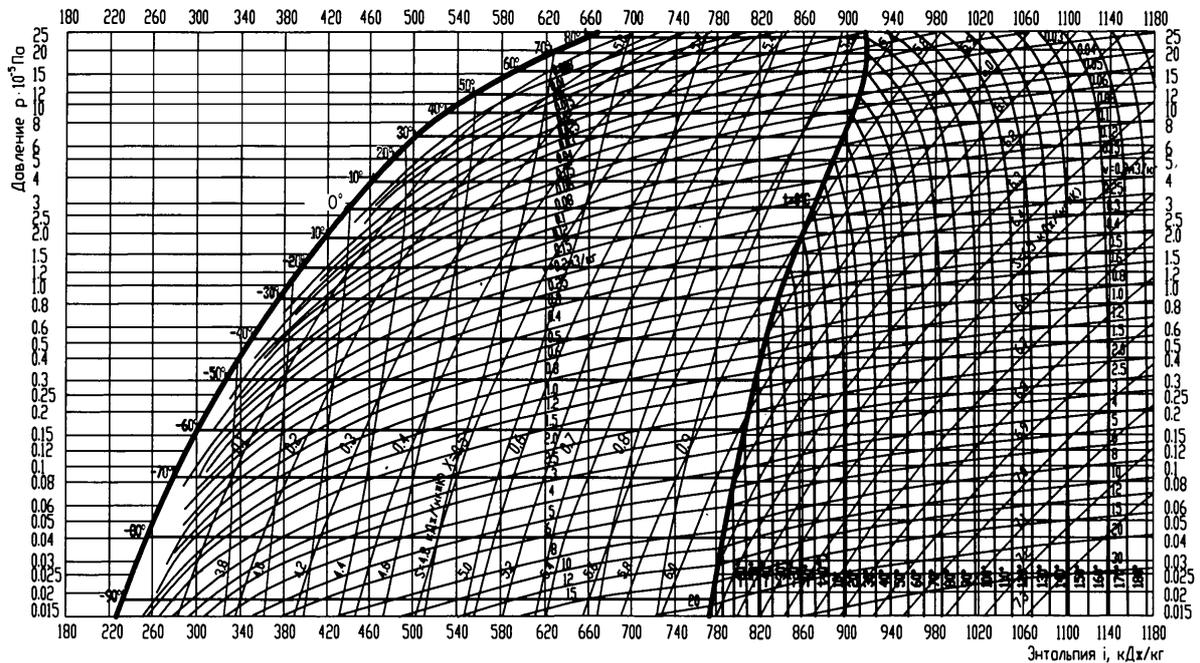


Рис. 2. Диаграмма "i-lnP" для ДМЭ, построенная в МГТУ им. Н.Э.Баумана

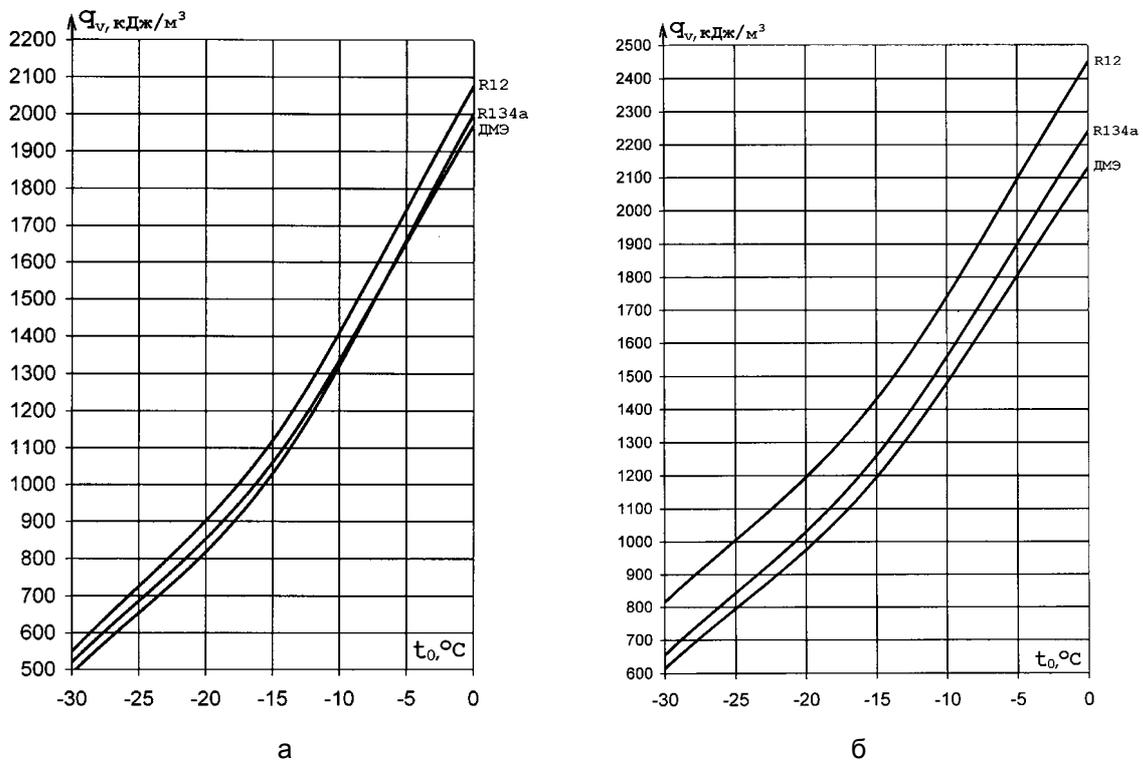


Рис. 3. Расчетные зависимости объемной удельной холодопроизводительности от температуры кипения для ДМЭ, R12 и R134а:
а) для нерегенеративного цикла; б) для регенеративного цикла

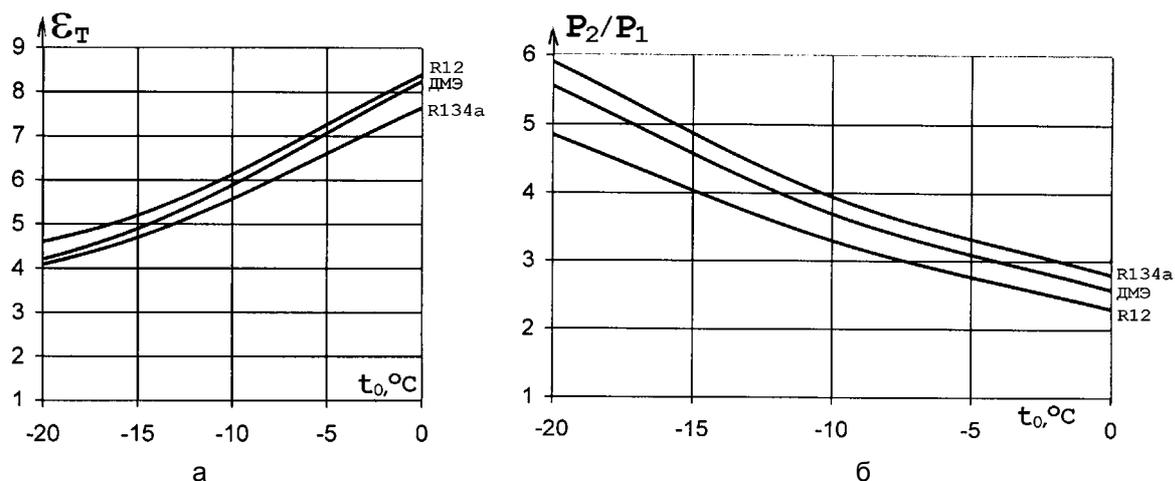


Рис. 4. Зависимость теоретического холодильного коэффициента (а) и отношения давлений нагнетания и всасывания (б) от температуры кипения для ДМЭ, R12 и R134а

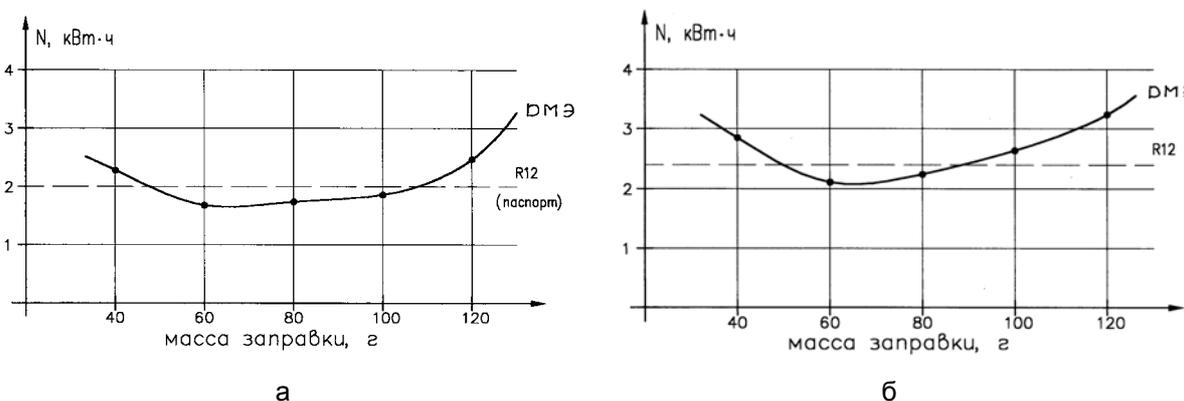


Рис. 5. Суточный расход электроэнергии холодильника "Стинол 106" на ДМЭ при температуре в морозильной камере $t_m = -24^\circ\text{C}$: а) для температуры окружающей среды $t_{o.c.} = +25^\circ\text{C}$; б) температуры окружающей среды $t_{o.c.} = +32^\circ\text{C}$ (б)

В последующем были соответственным образом подготовлены холодильные установки с ДМЭ в качестве рабочего хладагента, проведены необходимые экспериментальные исследования, сняты характеристики, которые сопоставлены с характеристиками машин на R12 и R134а. Анализ расчетных зависимостей позволил сделать вывод, что ДМЭ является реальной альтернативой широко известным хладагентам, обладая при этом уникальной экологической чистотой.

Анализ данных эксперимента проводился путем сравнения параметров холодильного цикла по основным величинам, характеризующим данный цикл, с экспериментальными данными для фреона R12:

Q_0 , кВт - холодопроизводительность цикла;

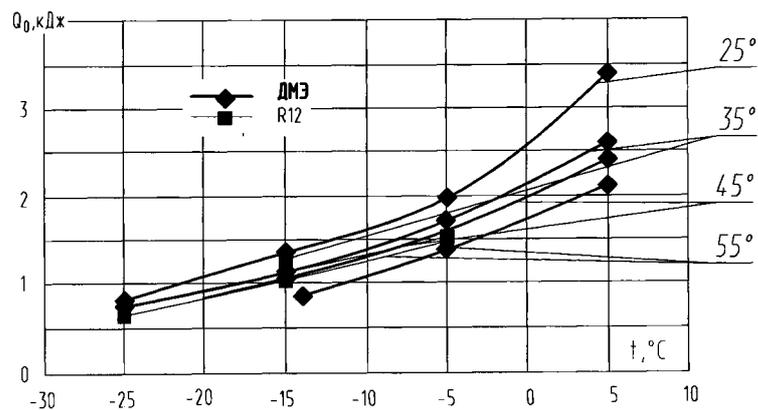
L , кВт - работа компрессора,

$\epsilon_{\text{эксп}} = Q_0 / L$ - экспериментальный холодильный коэффициент.

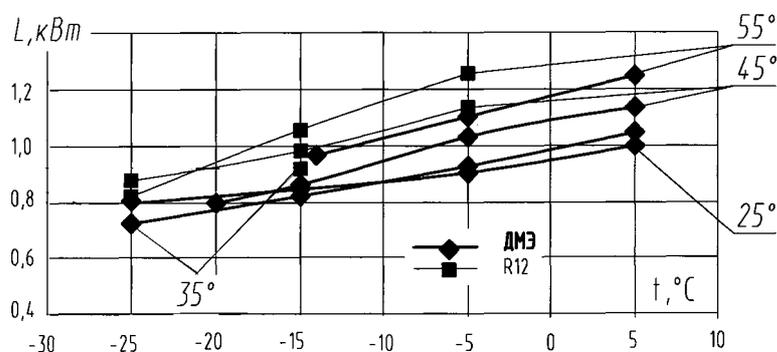
Результаты экспериментов приведены на рис. 6. Эксперимент также показал, что использование рекуперативного теплообменника в циклах с ДМЭ существенно усложняет и делает экономически холодильную машину, не давая значительного выигрыша в холодопроизводительности.

Экспериментальные исследования холодильных машин на ДМЭ и R12 подтвердили теоретические выводы в том, что ДМЭ способен заменить попадающие под контроль "парниковые" R12 и R134а в существующем и вновь разрабатываемом оборудовании без ухудшения его характеристик. Учитывая ожидаемое в перспективе внедрение ДМЭ как компонента моторного топлива для дизелей, он может стать в ряде случаев более

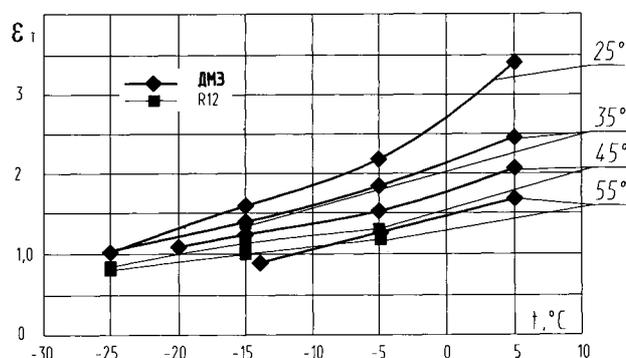
ПРИМЕНЕНИЕ ДИМЕТИЛОВОГО ЭФИРА В КАЧЕСТВЕ ТОПЛИВА И ХЛАДОАГЕНТА
ДЛЯ ГОРОДСКИХ АВТОМОБИЛЕЙ



а)



б)



в)

Рис. 6. Экспериментальные значения холодопроизводительности (а), работы компрессора (б) и холодильного коэффициента (в) в зависимости от температуры кипения для ДМЭ и R12

предпочтительным хладагентом по своей стоимости и доступности. Поэтому следует провести длительные ресурсные испытания холодильного оборудования на ДМЭ, рассмотреть вопросы взаимодействия ДМЭ с различными уплотнительными, изоляционными и другими материалами, используемыми сегодня в холодильной технике. Необходимо также экспериментально исследо-

вать процессы кипения и конденсации ДМЭ при различных температурах и давлениях, получить надежные данные о динамической и кинематической вязкости, теплопроводности газа и жидкости в диапазоне температур и давлений работы холодильного оборудования.

Часть 3. ДМЭ в качестве топлива и хладагента для дизельного транспорта с системами охлаждения и кондиционирования

К этим видам транспортных средств относится очень большое количество типов: авторефрижераторы, автобусы, легковые автомобили, тепловозы, корабли, катера, яхты и т.п.

В отличие от сжиженного пропан-бутанового газа диметилвый эфир подается в ДВС под давлением (3...5 МПа), поэтому

применение системы охлаждения или кондиционирования с открытым циклом нереально. Тем не менее в случае применения одного вещества в качестве топлива и хладагента отпадает необходимость дозаправки хладагентом, т.к. топливный бак может являться одновременно ресивером (или даже конденсатором) низкотемпературной системы. При этом снижается стоимость холодильного оборудования и его сервисного обслуживания. В качестве примера на рисунке 7 показана компоновка авторефрижератора.

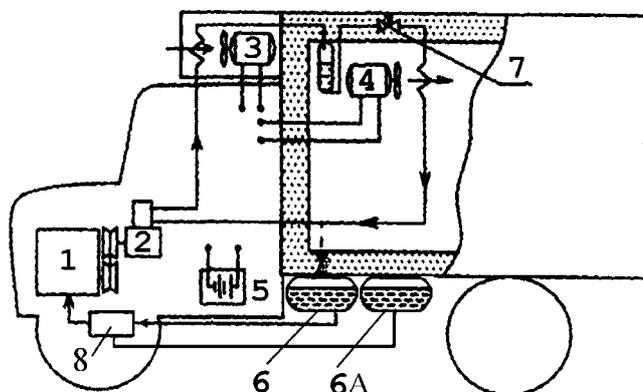


Рис. 7. Компоновка дизельного авторефрижератора, использующего ДМЭ в качестве топлива и хладагента: 1 - двигатель автомобиля, 2 - компрессор, 3 - вентилятор и конденсатор, 4 - вентилятор и воздухоохладитель, 5 - аккумулятор автомобиля, 6 - бак с ДМЭ, 6А - бак с ДТ, 7 - ТВР, 8 - система топливоподдачи дизеля

Ориентировочные значения затрат на приобретение холодильной установки для авторефрижератора на базе ЗИЛ "Бычок" приведены в табл. 3. Главным преимущест-

вом такого авторефрижератора является его экологическая чистота. К тому же, по стоимости он оказывается вполне приемлемым.

Таблица 3. Сравнение затрат при использовании R134a и ДМЭ в качестве хладагента для авторефрижератора на базе автомобиля ЗИЛ "Бычок" с дизельным двигателем Д.245

Первоначальные единовременные расходы		
Стоимость затрат	Установка на R134a	Установка на ДМЭ
Стоимость холодильной установки (1500 Вт), у.е.	3000	3000
Стоимость переоборудования автомобиля на экологически чистое топливо ДМЭ, у.е.	-	450
Стоимость монтажа холодильной установки, у.е.	1000	900
Стоимость расходных материалов (трубопроводов, хладагента, масла, крепежных элементов, изоляции, электрокабелей и т.д.), у.е.	500	400
Итого, у.е.	4500	4750

ПРИМЕНЕНИЕ ДИМЕТИЛОВОГО ЭФИРА В КАЧЕСТВЕ ТОПЛИВА И ХЛАДОАГЕНТА ДЛЯ ГОРОДСКИХ АВТОМОБИЛЕЙ

Окупаемость зависит от многих факторов: коммерческой конъюнктуры, размеров оплаты транспортных услуг, режимов эксплуатации, климата и т.п. Предварительный анализ показывает, что на перечисленных выше транспортных средствах установки для охлаждения или кондиционирования будут по стоимости не более дорогими, чем традиционные, работающие на фреоне R134a.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Диметиловый эфир - топливо и хладагент для дизельных авторефрижераторов / Богаченко В.Н., Глухов С.Д., Жердев А.А. и др. // Вестник МГТУ. Специальный выпуск. Сер. Машиностроение. 2000.
2. Christensen R., Sorenson S.C., Jensen M.G., Hansen K.F. Engine Operation on Dimethyl Ether in a Naturally Aspirated DI Diesel Engine // SAE Paper, № 971665, 1997. - P. 101-110.
3. Описание ПК "Впрыск" INTERNET, сайт МГТУ им. Н.Э. Баумана: <http://www.bmstu.ru/facult/em/em2/inject/illrus.htm>
4. Патрахальцев Н.Н. Аппаратура для газодизельного процесса // Автомобильная промышленность. - 1988. - № 7. - С. 16-17.
5. Вагнер В.А., Матиевский Д.Д. Осуществление добавки водорода к топливу и ее влияние на показатели работы дизеля // Двигателестроение. - 1985. - №2. - С. 11-13
6. Грехов Л.В. Научные основы разработки систем топливоподачи в цилиндры двигателей внутреннего сгорания: автореферат дис... докт. техн. наук. - М., 1999. - 32 с.
7. Жердев А.А., Макаров Б.А. Расчет циклов парокompрессионных холодильных машин с помощью уравнения состояния Редлиха-Квонга // Вестник МГТУ. - 2002 - № 11 С. 71-80.