

УДК 656.2:621.43.057

Е.Н. КАМЕНСКИЙ, Ю.И. БУЛЫГИН

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОЛОГИЧЕСКИХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОВОЗНЫХ ДВС ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТОПЛИВ КАЧЕСТВА EURO СТАНДАРТА

Проведены экспериментальные и теоретические исследования применения моторных топлив качества EURO стандарта в тепловозном дизеле. Получены явные технико-экологические и экономические эффекты использования топлив EURO4 и ЭКТО в маневровых тепловозах серии ЧМЭЗ по сравнению с дизельным топливом по ГОСТ 305-82. В результате испытаний выявлено улучшение тяговых, пусковых и топливно-экономических характеристик дизеля. Экспериментально подтверждено снижение выбросов сажи, оксидов углерода, азота и парниковых газов.

Ключевые слова: моделирование, двигатель внутреннего сгорания (ДВС), вредные выбросы, экологические и экономические характеристики, реостатные испытания.

Введение. В основных направлениях охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов в России на период до 2010 года в разделе научных исследований отмечено, что необходимо предусмотреть использование экологически безопасных видов топлива, а также создать высокоэффективные системы для предотвращения выбросов вредных веществ с отработавшими газами ДВС. Программа ОАО РЖД "Создание и освоение производства новых локомотивов в 2004-2010 гг." также предусматривает ужесточение технических требований к тепловозам в части снижения удельных расходов топлива подвижным составом и соблюдения действующих стандартов по экологии.

Качество дизельных топлив оказывает существенное влияние на надёжность, долговечность, экономичность ДВС и на формирование вредных выбросов. Нежелательными являются серо- и азотсодержащие соединения и ароматические углеводороды, особенно конденсированные. Поэтому особое внимание уделяется ужесточению требований к содержанию серы и полициклических ароматических углеводородов в моторных топливах.

С 1996 года в странах Европейского экономического сообщества действует европейский стандарт EN 590, в котором введены ограничения на содержание серы в дизельных топливах – не более 0,05 %. Стандарт предусматривает выпуск дизельных топлив для различных климатических регионов. Общими для дизельных топлив являются следующие требования: температура вспышки – не ниже 55 °С; коксуемость 10 %; остатка – не более 0,30 %; зольность – не более 0,01 %; содержание воды – не более 200 ppm; механических примесей – не более 24 ppm; коррозия медной пластинки – класс 1; устойчивость к окислению – не более 25 г осадка/м³.

В 2001 году в России для выпуска дизельного топлива, соответствующего требованиям европейской нормы EN 590:2000 ОАО «ВНИИ НП» были разработаны технические условия 38.401-58-296-2001 «Топливо дизельное автомобильное», а впоследствии ГОСТ Р 52368-2005. Показатели качества и методы испытаний полностью повторяют EN 590.

Основным отличием ГОСТ Р 52386-2005 от действующих нормативных документов (ГОСТ 305-82) являются жесткие требования на содержание серы – не более 350 ppm, цетановое число – не менее 51 ед. При этом нормируются

4 новых показателя качества: цетановый индекс – не менее 46; смазывающая способность – не более 460 мкм; полициклические ароматические углеводороды – не более 11%; окислительная стабильность – не более 25 мг/м³. Сера

определяет количество окислов серы и содержание твердых частиц в отработавших газах дизелей. Цетановое число и цетановый индекс – показатели воспламеняемости дизельного топлива, от которых зависит время запуска двигателя, жесткость рабочего процесса, расход топлива и дымность отработавших газов. Сравнительный анализ основных свойств дизельных топлив, применяемых в настоящее время на железнодорожном транспорте по ГОСТ 305-82, и топлив, выпускаемых отечественными НПЗ в соответствии с европейской нормалью EN 590, приведён в табл.1.

Таблица 1
Физико-химические свойства исследуемых моторных топлив

Компонент	Единицы измерения	Марка топлива		
		ГОСТ 305-82	EURO 4	ЭКТО-дизель
Полиароматики	% масс.	9,0	4,15	2,1
Сера	%, масс.	0,062	0,033	0,053
Цетановое число	-	45	52	52
Плотность при 20 °С	кг/м ³	827,4	830,2	831,6
Вязкость при 40 °С	мм ² /с	4,5	3,12	2,99
Температура вспышки	°С	58	58	48
Низшая теплота сгорания	кДж/кг	42914	42914	42835
Смазывающая способность	мкм	-	290	400

В табл.1 представлены фактические значения компонентов дизельного топлива, полученные на основе физико-химического анализа, произведённого в центральной химической лаборатории Новочеркасской ГРЭС. Результаты анализа свидетельствуют о существенной разнице в свойствах дизельных топлив.

Постановка задачи. При использовании стандартного нефтяного топлива достаточно затруднительно предсказать, как и насколько изменятся параметры рабочего процесса двигателя при изменении физико-химических свойств топлива, параметров камеры сгорания, топливоподачи и т.д. Таким образом, возникает проблема оптимальной организации рабочего процесса тепловозного дизеля, которая требует тщательного исследования и проведения НИОКР.

Очевидно, что представляют интерес изучение и исследование влияния эксплуатационных показателей рассматриваемых топлив на технико-экологические и экономические характеристики силовой установки тепловоза.

Известно, что к основным эксплуатационным показателям дизельного топлива относятся:

- цетановое число, определяющее высокие мощностные и экономические показатели работы двигателя;

- фракционный состав, определяющий полноту сгорания, дымность и токсичность отработавших газов двигателя;
- вязкость и плотность, обеспечивающие нормальную подачу топлива, распыливание в камере сгорания и работоспособность системы фильтрации;
- низкотемпературные свойства, определяющие функционирование системы питания при отрицательных температурах окружающей среды и условия хранения топлива;
- степень чистоты, характеризующая надежность работы фильтров грубой и тонкой очистки и цилиндропоршневой группы двигателя;
- температура вспышки, определяющая условия безопасности применения топлива в дизелях;
- наличие сернистых соединений, непредельных углеводородов и металлов, характеризующие нагарообразование, коррозию, износ, а также смазывающие свойства.

Для реализации поставленных целей были проведены реостатные испытания маневрового тепловоза ЧМЭ 3 на пункте экологического контроля локомотивного депо ст. Батайск в июле и октябре 2008 г на различных видах дизельного топлива. Реостатные испытания включали помимо определения основных технических характеристик замеры экологических параметров тепловоза и дополнительно измерение массового расхода топлива.

Экспериментальные исследования. При проведении испытаний руководствовались: разработанными "Программой и методикой испытаний маневровых тепловозов на разных видах моторного топлива"; технологической инструкцией по проведению реостатных испытаний; комплектом технической документации на реостатную станцию; техническими условиями (ТУ) замеров технико-экологических параметров на ПЭК.; комплектом технической документации на ПЭК; сертификатами качества продукции концерна "ЛУКОЙЛ" и протоколами результатов химического анализа состава испытываемых топлив (см.табл.1).

Испытания включали в себя определение таких показателей, как: величины компрессии по цилиндрам; уровней шума в контрольных точках тепловоза; давления масла в системе смазки при фиксированных оборотах двигателя и определённой температуре; электрической мощности силовой установки тепловоза; массового расхода топлива двигателем; давления и температуры надвучного воздуха в дизель; температуры отработанных газов (ОГ) в выпускном коллекторе дизеля; температуры воды и масла в системе охлаждения дизеля; экологических параметров тепловозов по ГОСТ Р 50953-96 (содержание вредных веществ (ВВ) и дымность ОГ).

Используемые средства и схемы измерений. Использовалось штатное приборное обеспечение реостатной станции (табл.2), а также средства измерений и оборудование ПЭК, применяемые для проведения экологического контроля тепловозных дизелей (табл.3).

Таблица 2

Штатное приборное обеспечение реостатной станции

Наименование	Измеряемый параметр(ы)	Класс точности
Тахометр (0-900 об/мин)	Обороты коленчатого вала дизеля	Цена деления 20 об/мин
Амперметр (0-4000 А)	Ток тягового генератора	1,0
Вольтметр (0-600 В)	Напряжение тягового генератора	1,0
Манометр (0-1 атм)	Давление воздуха в надувочном коллекторе дизеля	Цена деления 0,02 атм
Манометр (0-10 атм)	Давление топлива в коллекторе	Цена деления 0,2 атм
Манометр (0-10 атм)	Давление масла на входе в дизель	Цена деления 0,2 атм
Максиметр (0-100 атм)	Давление вспышки по цилиндрам	Цена деления 1 атм
Топливный расходомер	Расход топлива дизелем	Цена деления 0,2 литра
Ареометр	Плотность дизельного топлива	Цена деления 0,01 г/см ³
Пирометр (0-1000 С°)	Температура отработавших газов по цилиндрам и перед турбиной	Цена деления 1 С°
Барометр-анероид М-73	Атмосферное давление	2,0
Термометр ТЛ, ТП-6	Температура окружающего воздуха	0,1°С

Таблица 3

Приборы экологического контроля

Наименование	Измеряемый параметр(ы) (компонент(ы))	Погрешность измерений, %
Газоанализатор: Vario Plus (Германия) оснащенный разъемом RS-232 для подключения к ПЭВМ, LCD-дисплеем с подсветкой, встроенным принтером, интегрированной памятью на 300 измерений, дисководом для записи и передачи данных, зондом для отбора проб, радиатором для охлаждения газа, обогреваемым шлангом.	O ₂ , CO, SO ₂ , NO, NO ₂ , H ₂ S, сажа, избыток воздуха по дефициту кислорода, температура воздуха температура газа давление разрежения	0,2 5,0 5,0 3,0 3,0 3,0 4,0 2,0 0,5 К 2,0 2,0
Система пробоотбора и пробоподготовки 12.00.000 ТУ (термошланг и регулятор температуры)	Обеспечение подготовки и доставки пробы	
Система обеспечения сжатым воздухом	Обеспечение забора пробы и продувка	
Манометр МО-250 (ГОСТ 6521-72)	ТО ПЭК	1,5
Барометр-анероид М-73	Атмосферное давление	2,0
Термометр ТЛ, ТП-6	Температура окружающего воздуха	0,1°С

Для определения дымности отработанных газов тепловозного дизеля использовался микропроцессорный оптический дымомер "ИДС-3" (Украина), предназначенный для экспрессного измерения дымности и имеющий погрешность при измерении дымности не более $\pm 2\%$.

Для замеров уровней шума двигателя тепловоза в контрольных точках использовался измерительный прибор – ВШВ – 003-М3, 000, кел.1.

Схемы измерения электрической мощности тепловоза и массового расхода топлива приведены на рис.1 и 2.

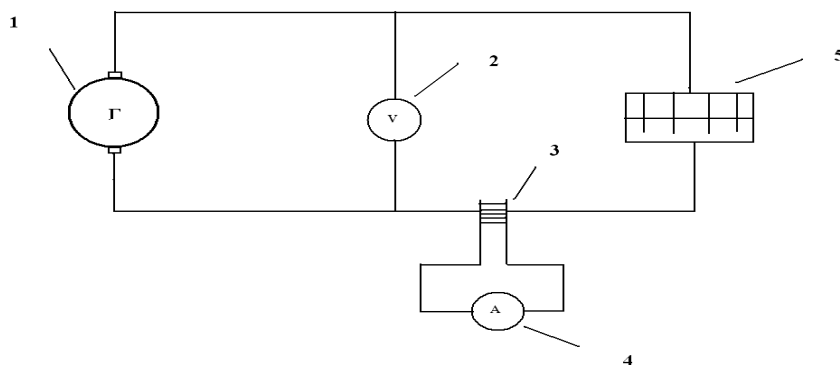


Рис.1. Схема реостатной установки для измерения мощности тепловоза:
1 – главный генератор; 2 – вольтметр (0-1000 В); 3 – шунт килоамперметра;
4 – килоамперметр; 5 – водяной реостат

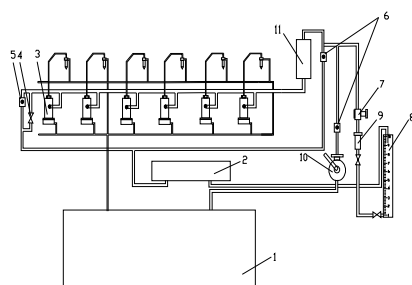


Рис.2. Схема измерения массового расхода топлива дизелем тепловоза:
1 – топливный бак; 2 – топливopодогpевателю; 3 – топливный насос высокого давления; 4 – вентиль; 5 – перепускной клапан; 6 – обратный клапан; 7 – топливopодкачивающий насос; 8 – объемный топливомер; 9 – фильтр грубой очистки; 10 – ручной насос; 11 – фильтр тонкой очистки

Примечание. В мерной ёмкости контролируются температура и плотность топлива для того, чтобы повысить точность последующего пересчёта объёмного расхода в массовый. Объёмный расход топлива определяется за счёт разности показаний топливомера и объёма сливаемого топлива в мерную ёмкость.

Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 3, 4, где режимами 2, 3, 4, 5 обозначена соответствующая мощность тепловоза на 2, 4, 6 и 8 поз. – контроллера-машиниста.

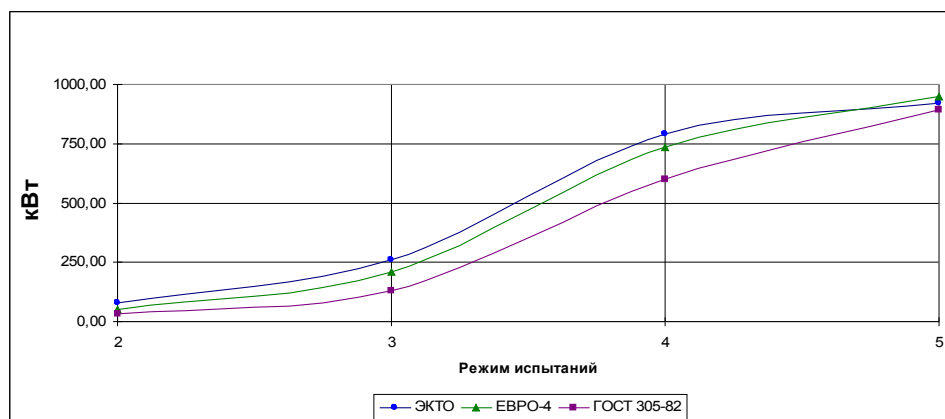


Рис.3. Тяговая характеристика тепловоза

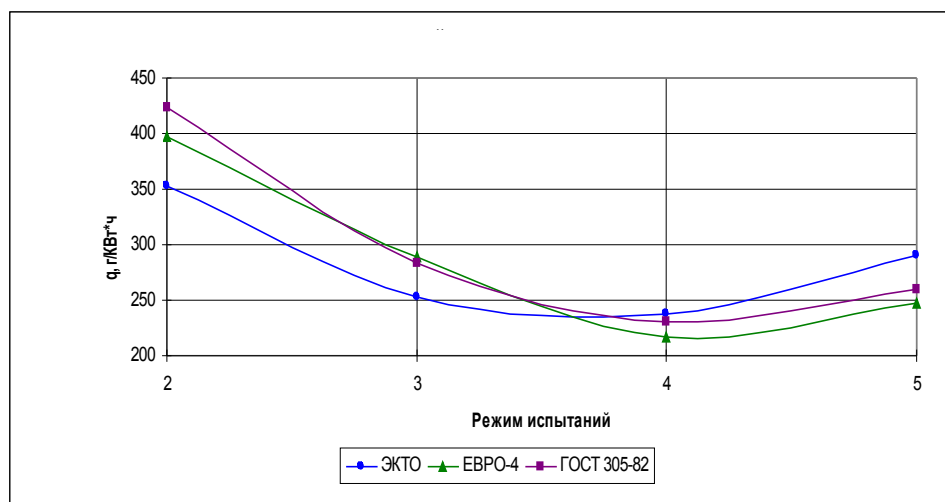


Рис.4. Удельный расход топлива

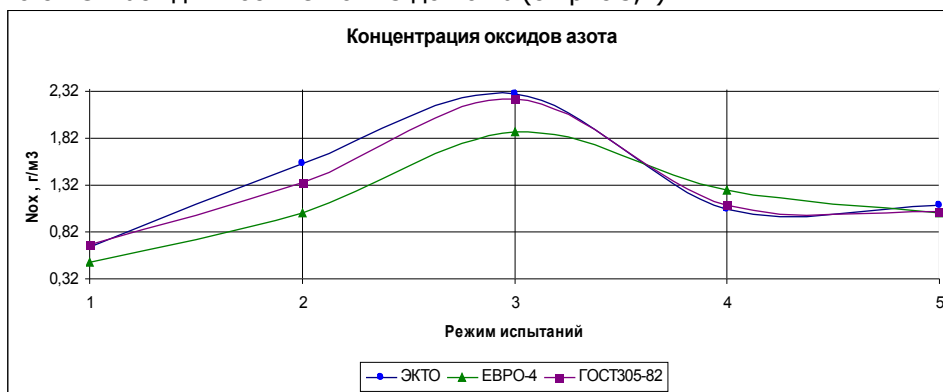
Как следует из тяговых характеристик тепловоза (см.рис.3), при работе на топливах EURO 4 и "ЭКТО-дизель" достигается явный эффект увеличения мощности силовой установки по сравнению с применяемым топливом по ГОСТ 305-82. Причём, если на номинальной нагрузке он составляет 3,0...6,1 %, то при работе на частичных режимах (поз.2 и 4 контроллера) эффект достигает больших значений.

Наряду с увеличением мощности работа дизеля на топливах EURO 4 и "ЭКТО-дизель" сопровождается более "мягкой" работой ДВС, максимальные давления сгорания по цилиндрам дизеля K6S310DR при его работе на испытываемых топливах снижаются (около 5-6 %), уменьшается жёсткость процесса, что свидетельствует о снижении скорости нарастания давления внутри камеры при сгорании топлива. Последний вывод подтверждается замерами уровней шума на расстоянии 1 м от тепловоза на пункте экологического контроля (ПЭК), которые снижаются на 2-3 дБ.

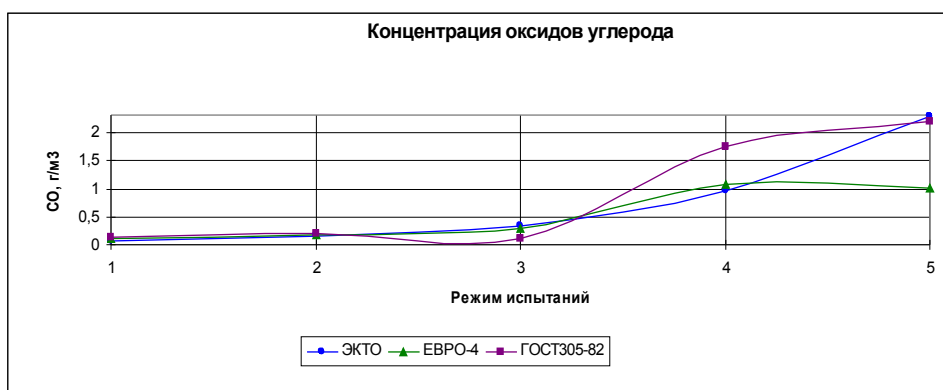
При работе тепловоза на EURO 4 наблюдается снижение температуры отработанных газов (ОГ) в зависимости от режима на 55...110 °С. При номинальной нагрузке это снижение отмечено и для топлива "ЭКТО-дизель",

однако при частичных нагрузках и на холостом ходу $T_{ог}$ значительно выше (на 80...120 °С) для «ЭКТО-дизель», чем при работе на топливе по ГОСТ305-82. Последнее обстоятельство очевидно связано с тем, что в топливо «ЭКТО-дизель» добавлены дополнительные депрессивные присадки. Об улучшении экономичности тепловоза при переходе на новые виды топлива EURO стандарта свидетельствуют зависимости, полученные экспериментально и представленные на рис.3, 4. Как видно из графиков (см.рис.4), при работе ДВС тепловоза ЧМЭЗ на топливе EURO-4 удельные расходы топлива снижаются в среднем на 12,7...23,7 г/кВт·ч, что значительно превышает погрешность данного способа измерения - 5-6 г/кВт·ч. Эффект снижения удельных расходов топлива зафиксирован и при работе на «ЭКТО-дизель», который составил на режимах холостого хода и поз.2 контроллера машиниста – 30...50 г/кВт·ч.

Что касается экологических эффектов, то они наблюдаются практически по всем регистрируемым загрязняющим веществам (рис.5). Так, снижение наиболее токсичных в ОГ тепловоза оксидов азота составило от 10 до 20 % практически на всех нагрузочных режимах при работе на топливе EURO 4 (см.рис.5,а). Концентрации оксидов углерода уменьшились практически в 2 раза особенно на 6 и 8 поз. контроллера (см.рис.5,б). Значительно снизилась дымность ОГ от 25 до 40 % (см.рис.5,в).

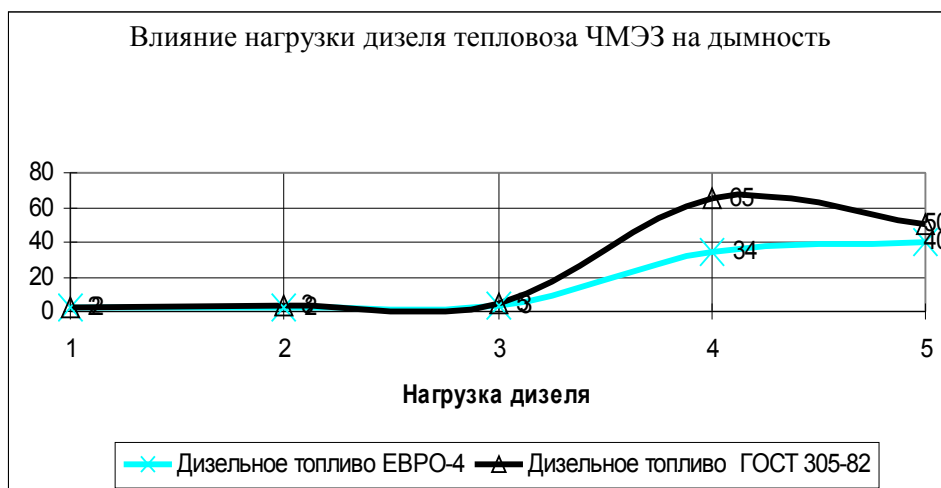


а)



б)

Рис.5. Концентрации в отработанных газах дизеля К6S310DR тепловоза ЧМЭЗ:
а – оксидов азота; б – оксидов углерода; в – отработанных газов
(окончание см. с. 465)



в)

Рис.5. Окончание

Улучшение технико-экологических параметров работы маневрового тепловоза наиболее проявилось в отношении топлива EURO 4. При работе на моторном топливе “ЭКТО-дизель”, как видно из полученных экспериментальных зависимостей, эффекты имеют место не всегда и не на всех режимах работы машины.

Следует заметить, что полученные авторами результаты подтверждены целой серией испытаний и экспериментальных исследований на ПЭК и реостатной станции тепловозов, а также исследованиями автомобильного дизеля КАМАЗ на одном из транспортных предприятий г. Ростова-на-Дону [1].

Модельные расчеты. Полученные экспериментальные данные достаточно хорошо согласуются и с результатами численных расчётов по известным моделям [2] и [3]. В качестве исходных данных для расчетов задавались химические составы исследуемых топлив. Для топлива по ГОСТ 305-82 состав был принят исходя из формулы: С – 86,1 %, Н – 13,3 %, О – 0,04 %, N – 0,05 %, S – 0,5 %, Pb – 0 %, A – 0,01 %, W – 0 %. При пересчёте состава топлива с пониженным содержанием серы и полиароматиков по ГОСТ 52368-2005 исходили из того, что снижение доли серы распределялось пропорционально между углеродом и водородом согласно общей формулы дизельного топлива $C_{14}H_{30}$. Модельные расчёты по программе ENGINE были произведены для распространенных тепловозов на СКЖД – маневрового тепловоза ЧМЭ 3 (двигатель K6S310DR) и магистрального тепловоза 2ТЭ10 (двигатель 10Д100). Результаты расчетов показаны на рис.6-8.

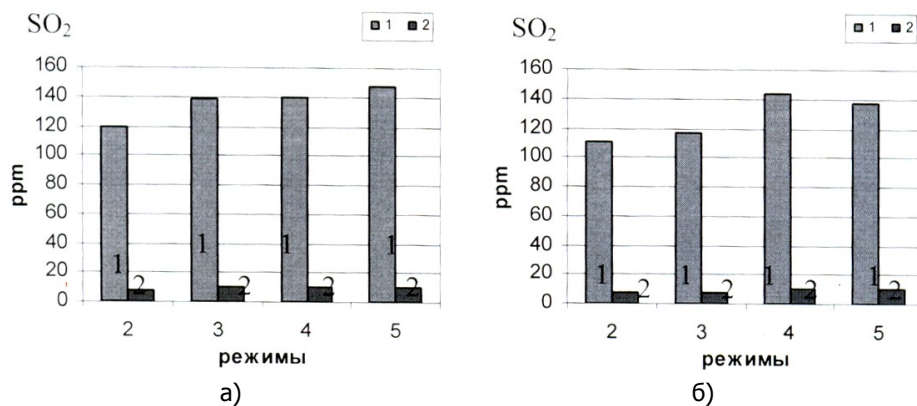


Рис.6. Значения выбросов оксидов серы в отработанных газах дизеля: а – тепловоз ЧМЭ 3 (K6S310DR); б – тепловоз 2ТЭ10 (10Д100); 1 – дизельное топливо по ГОСТ 305-82; 2 – дизельное топливо EURO4 по ГОСТ 52368-2005

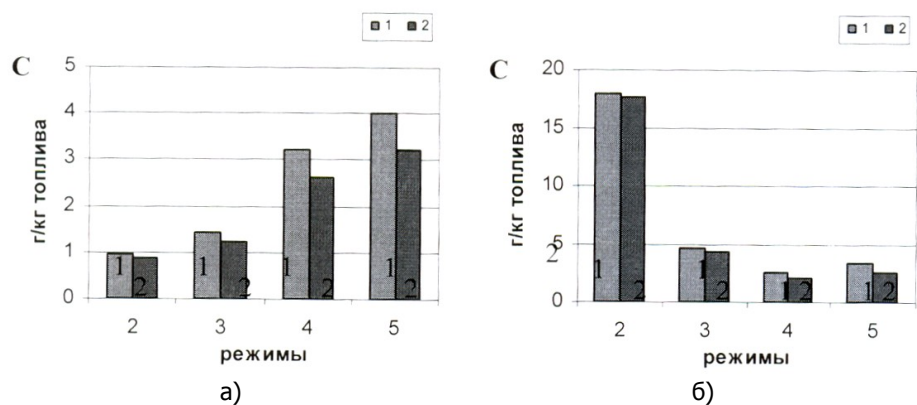


Рис.7. Значения выбросов сажистых частиц в отработанных газах дизеля: а – тепловоз ЧМЭ 3 (K6S310DR); б – тепловоз 2ТЭ10 (10Д100); 1 – дизельное топливо по ГОСТ 305-82; 2 – дизельное топливо EURO4 по ГОСТ 52368-2005

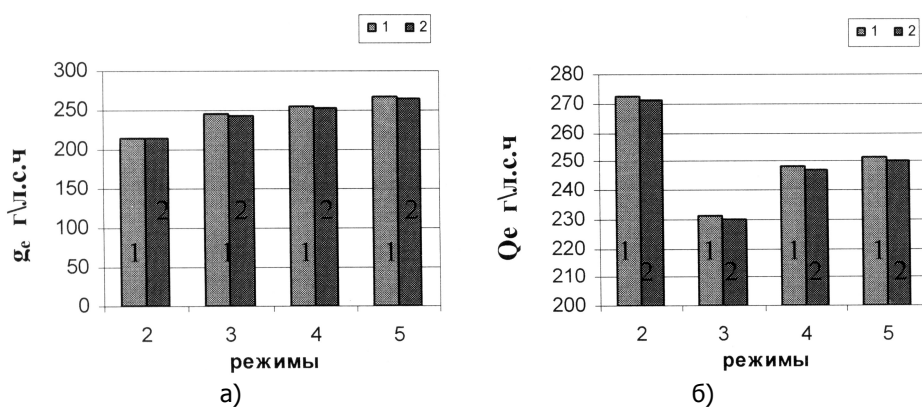


Рис.8. Удельный расход топлива по режимам работы дизеля: а – тепловоз ЧМЭ 3 (K6S310DR); б – тепловоз 2ТЭ10 (10Д100); 1 – дизельное топливо по ГОСТ 305-82; 2 – дизельное топливо EURO4 по ГОСТ 52368-2005

Полученные технико-экологические и экономические эффекты в работе маневрового тепловоза предполагают на следующем этапе работ проведение дальнейших исследований, связанных с настройкой и регулированием топливной аппаратуры дизеля. Речь идёт не только о настройках по углу опережения впрыска УОВ ДВС для новых топлив (в связи с другими цетановыми числами), но и о регулировании производительности ТНВД или давления открытия форсунки при впрыске топлива в цилиндр. При этом может быть получена ещё большая эффективность работы дизелей подвижного состава.

Теоретические исследования позволят установить связь индикаторной работы, удельного расхода топлива, периода задержки воспламенения и жёсткости процесса сгорания с цетановым числом топлива, его вязкостью и плотностью. Для этого необходимы дальнейшие расчётные исследования по программе Diesel-RK (МГТУ им. Баумана) [3]. В ней можно задавать не только различный химический состав топлива и разный УОВ, но и такие влияющие параметры, как цетановое число, плотность, вязкость, задержка воспламенения, давления распыла топлива по режимам и другое.

При применении дизельных топлив качества EURO стандарта в сравнении с топливом (ГОСТ 305-82) снижаются средневзвешенные выбросы NO_x на 9%, CO на 23%, SO_2 на 90%, CO_2 на 12 %, сажи на 9%, при этом экономия дизельного топлива составляет около 4%.

Выводы. 1. Экспериментальные исследования подтвердили ряд экологических эффектов от применения нового моторного топлива, которые в основном связаны со следующими положениями:

- снижение выбросов сажи за счёт более глубокой очистки топлива (меньшее содержание серы и полиароматических углеводородов);
- уменьшение выбросов CO за счёт большей полноты сгорания топлива;
- несмотря на положение теории Я.Б. Зельдовича о том, что выход оксидов азота не зависит от вида топлива, экспериментально обнаружено сокращение выхода NO для топлива EURO4, что может быть связано с большей однородностью очищенного топлива, при горении которого образуется меньше локальных неоднородных зон горения в камере сгорания ДВС;
- существует оптимальное количество серы в топливе, так как при снижении его до минимума необходимо добавление компенсирующих присадок (проявляются отрицательные эффекты, например, ухудшается смазывающая способность для топливной аппаратуры);
- меньшая вязкость нового моторного топлива улучшает характеристики распыла топлива форсунками, и процесс сгорания проходит более полно.

2. Установлено снижение массового расхода топлива, несмотря на то, что топливо EURO стандарта обладает такой же теплотворностью, как и топливо по ГОСТ 305-82. Данный эффект связан с тем, что величина цетанового числа нового топлива значительно больше, следовательно, в связи с уменьшением периода задержки воспламенения это вызывает эффект, аналогичный увеличению геометрического угла опережения впрыскивания топлива при неизменном цетановом числе, что способствует улучшению экономичности. Кроме того, у топлива "ЭКТО-дизель", как видно из протокола испытаний, ниже температура вспышки, что также способствует уменьшению периода задержки воспламенения. В результате экономич-

ность улучшается явно на 13...23 г/кВт·ч, что выше погрешности измерений 4-5 г/кВт·ч.

3. Экспериментально установлено улучшение технических параметров работы тепловоза, тяговой характеристики, снизилась жёсткость рабочего процесса дизеля тепловоза, улучшились пусковые свойства силовой установки и приёмистость ДВС.

Библиографический список

1. Алексеенко Л.В. Снижение токсичности отработавших газов и повышение экономичности транспорта при использовании топлива EURO стандарта. / Л.В. Алексеенко, Ю.И. Булыгин, Е.Н. Каменский, Д.В. Деундяк, Д.А. Корончик // Экология и промышленность России. – М.: ЗАО "Калвис", 2008.

2. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2002610605 РФ. Расчет энергоэкологических параметров ДВС "ENGINE" / Ю.И.Булыгин, О.В. Яценко, И.Н. Жигулин, Е.Н. Ладоса. Приоритет от 11.03.2002. – Оpubл. в Б.П.2002. Бюл. № 3.

3. Кулешов А.С. Математическое моделирование и компьютерная оптимизация топливоподачи и рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания. / А.С. Кулешов, Л.В. Грехов. – М.: МГТУ, 2000. – 64 с.

Материал поступил в редакцию 25.02.09.

J.I. BULYGIN, E.N. KAMENSKY

THE RESEARCH OF TECHNICO-ECOLOGICAL AND ECONOMIC CHARACTERISTICS OF DIESEL EIC WITH USING OF EURO-STANDARD QUALITY FUELS

Experimental and theoretical studies of the use of motor fuel quality EURO standard diesel locomotive. Explicit technical, environmental and economic effects of the use of fuels and EURO4 ETKO in shunting locomotive compared with diesel fuel according to GOST 305-82. As a result, the tests demonstrated improvement in traction, launch and fuel-economic characteristics of the diesel engine. Experimentally confirmed by the reduction in emissions of soot, carbon monoxide, nitrogen and greenhouse gases.

БУЛЫГИН Юрий Игоревич (р.1966), профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды» ДГТУ, доктор технических наук (2007). Окончил Ростовский институт инженеров железнодорожного транспорта (1988).

Область научных интересов – транспортная экология, безопасность жизнедеятельности, исследования тепловых двигателей.

Имеет более 112 научных публикаций.

КАМЕНСКИЙ Евгений Николаевич (р.1980), аспирант кафедры «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды». Окончил Ростовский государственный университет путей сообщения (2002).

Область научных интересов – транспортная экология.

Имеет 5 научных публикаций.

bulyur_rostov@mail.ru