

ОПТИМАЛЬНОЕ СООТНОШЕНИЕ ДИЗЕЛЬНОГО И ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВ ПО КРИТЕРИЮ ПРИВЕДЕННОГО ВЫБРОСА ТОКСИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ

Олег Болтянский, Ирина Милаева, Алексей Стефановский

Таврический государственный агротехнологический университет

Проспект Богдана Хмельницкого, 18, Мелитополь, Украина. E-mail: tia_tgata@bk.ru

Oleg Boltyansky, Irina Millayeva, Alexey Stefanovsky

Tavriya State Agrotechnology University

Bogdan Khmelnytsky Ave., 18, Melitopol, Ukraine. E-mail: tia_tgata@bk.ru

Аннотация. Проанализирован ряд опубликованных работ об исследовании рабочего процесса и токсичности отработавших газов дизелей при одновременном использовании минерального дизельного топлива и горючего газа. Поставлена задача оптимизации состава их «смеси» по критерию приведенного выброса токсичных (вредных) веществ, который следует минимизировать.

На основе результатов испытаний дизелей 4ЧН 10,4/11,3 и 6ЧН 12/14 рассчитан удельный приведенный выброс этих веществ (при двух способах приведения). Представлены его зависимости от процентного содержания горючего газа в «смеси» с дизельным топливом для двух уровней относительной нагрузки дизелей – 10 и 80% номинальной мощности. Показано, что способ приведения выбросов отдельных вредных веществ к выбросу «эталонного» загрязнителя влияет не на характер полученных зависимостей, а на величину приведенного выброса. Анализом результатов расчета удельного приведенного выброса вредных веществ с отработавшими газами дизеля 6ЧН 12/14 установлено, что на его величину оказывает незначительное влияние учёт выброса твёрдых частиц.

На «смеси» дизельного топлива и двух газов (водорода и сжиженного нефтяного, находившихся в соотношении 3:7) дизель 4ЧН 10,4/11,3 работал наиболее экономично и с незначительным удельным приведенным выбросом вредных веществ в широком диапазоне относительной нагрузки (10 и 80%). В данных случаях, минимумы этого выброса достигаются при таких процентных содержаниях этой смеси двух газов: при относительной нагрузке дизеля 10% - 30%; при относительной нагрузке дизеля 80% - 40%. Использование же водорода и сжиженного нефтяного газа порознь в «смеси» с дизельным топливом давало существенно худшие результаты.

Применение «смеси» дизельного топлива и горючего газа, как правило, позволяет уменьшить удельный выброс основного загрязнителя атмосферы – оксидов азота, облегчая их нейтрализацию в выпускной системе дизеля для выполнения действующих нормативов. В то же время, удельный выброс углеводородов с отработавшими газами при этом возрастает.

Ключевые слова: дизель, дизельное топливо, горючий газ, токсичность, выброс.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Одним из путей экономии минерального дизельного топлива (ДТ) транспортными двигателями внутреннего сгорания, где происходит самовоспламенение рабочей смеси топлива и воздуха (то есть дизелями), служит перевод их на питание одновременно ДТ и горючим газом (ГГ). При этом ГГ смешивается со впускаемым в цилиндры воздухом, а порция ДТ (так называемая «запальная» или «пилотная») впрыскивается туда из форсунок; условно же можно считать, что дизель работает на «смеси» ДТ и ГГ. Как показал опыт, в дизелях можно использовать различные ГГ: природный (в основном, метан CH_4), сжиженный нефтяной (пропанобутановую смесь, английская аббревиатура LPG) и др. Однако в современных условиях нужно учитывать не только экономические соображения, но и экологические факторы.

При изменении соотношения ДТ и ГГ, а также состава ГГ может существенно изменяться содержание вредных веществ в ОГ дизеля, зависящее от особенностей протекания сгорания рабочей смеси. Поэтому необходимо оптимизировать указанное соотношение (начиная с конкретных случаев), чтобы при сгорании такой смеси образовывалось меньше этих веществ. Тогда и нейтрализация их с помощью тех или иных способов обойдётся дешевле.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В журнале «MOTROL» освещались проблемы, затрудняющие более широкое использование природного газа в дизелях [1-3]. Однако, в этих работах не анализировались показатели токсичности отработавших газов (ОГ) этих двигателей.

Рабочий процесс транспортных дизелей и токсичность их ОГ при использовании как одного ДТ, так и совместно ДТ и природного газа изучались в Украине проф. Долгановым К.Е., проф. Парсадановым И.В. и их сотрудниками [4, 5]. Испытаниям подвергались, соответственно, дизели ЯМЗ-236ГД (6ЧГД 13/14) и СМД-31 (6ЧНГД 12/14; в таких обозначениях «Ч» - 4-тактный, «Н» - с наддувом, «ГД» - газодизель). Количество исследованных соотношений ДТ и природного газа (ПГ) при этом составляло, соответственно, два и одно. У дизеля ЯМЗ-236ГД доля ПГ в общей цикловой подаче двух топлив составляла примерно 33% и 62% (соответственно, при нагрузке более половины номинальной и низкой

нагрузке); у дизеля СМД-31 доля ДТ составляла 15% массы цикловой подачи обоих топлив. В книге [5] предложено полезное соотношение, позволяющее по концентрации углеводородов (СН) в ОГ и относительной дымности ОГ определить концентрацию твердых частиц (ТЧ) в ОГ. Это необходимо потому, что агрессивность углеводородов и ТЧ к человеческому организму, отражаемая соответствующими предельно-допустимыми концентрациями (ПДК) в воздухе, неодинакова. Поэтому, в частности, не совпадают и нормативы, установленные на содержание или выброс в ОГ СН и ТЧ [6, 7].

Вопросы влияния состава ГГ и соотношения ДТ и ГГ в «смеси» топлив, потребляемых дизелями, на их экономичность и токсичность ОГ исследовались индийскими учёными [8 - 11]. В работах [10, 11] достаточно широко варьировалось данное соотношение и опубликованы данные о содержании основных токсичных веществ в ОГ дизеля Ashok Leyland ALU W04CT (4ЧНГД 10,4/11,3), а также о дымности ОГ. Однако в этих работах соотношение ДТ и ГГ оптимизировано лишь по критерию наибольшей экономичности работы двигателя. Для случая совместного использования водорода H_2 и LPG, в частности, установлено, что наиболее экономично указанный двигатель работал при соотношении H_2 и LPG 3:7. В работе [8] не определялось содержание оксидов азота в ОГ испытанного одноцилиндрового дизеля, являющихся основным вредным веществом. Работа [9] является обзорной по отношению к другим, здесь упомянутым.

Чтобы оптимизировать соотношение ДТ и ГГ по критерию минимальной токсичности ОГ, нужно учесть различия в агрессивности разных вредных веществ (оксида углерода CO, СН, оксидов азота NO, ТЧ и др.), образующихся в различных химических реакциях при сгорании рабочей смеси в цилиндрах дизеля. Типичным приёмом здесь служит выбор «эталонного» загрязнителя, ПДК которого принимается за условную единицу масштаба агрессивности вредных веществ, содержащихся в ОГ.

Здесь наметились разные подходы [5, 12, 13]. «Эталонным» загрязнителем чаще всего считается CO, но есть сведения [13], что в 1999 г. российскими учеными-экологами таким загрязнителем предложено считать диоксид серы SO_2 . В то же время, для малосернистых ДТ выброс диоксида серы в ОГ незначителен, даже с учётом его повышенной агрессивности. В связи с происходящим постепенным пересмотром значений ПДК разных веществ, В. Азаров [14] предложил считать «эталонным» загрязнителем такой, ПДК которого принимается равной 1 мг/м^3 . Однако этот подход кажется искусственным, так как вместо 1 мг/м^3 можно было бы выбрать величину 0,1 или 10 мг/м^3 .

Поскольку в изученной литературе, в частности, изданной в Украине, токсичность вредных веществ, находящихся в ОГ дизелей, суммируется посредством приведения всех выбросов к CO, то этот способ далее считается основным. Дополнительно, для сравнения результатов, использован метод приведения выбросов по В. Азарову.

Не все опубликованные данные о токсичности ОГ дизелей, работавших на «смесях» ДТ и ГГ, одинаково пригодны для анализа в настоящем исследовании. Так, данные о токсичности ОГ дизеля 6ЧГД 13/14 [4], цитированные в книге [12], характеризуют концентрацию в ОГ различных вредных веществ, выраженную в процентах, а данные [5] – не только её, но и массовый выброс вредных веществ. Поскольку для расчёта массового выброса вредных веществ по известным их концентрациям в ОГ опубликованной информации [12] недостаточно, а наиболее информативен именно удельный массовый выброс (на 1 кВт мощности двигателя), то далее анализировались некоторые результаты работы [5] для дизеля СМД-31.

По аналогичной причине не использовались результаты работы [15] польских специалистов, исследовавших показатели дизелей грузовых автомобилей DAF и MAN на «смеси» ДТ и сжиженного нефтяного газа (LPG). В этой работе приведены показатели токсичности ОГ, выраженные в граммах на километр пробега автомобиля по ездовым циклам. По этим показателям невозможно определить удельный массовый выброс вредных веществ в ОГ.

Затруднительно это и для результатов, полученных в работе [16] при испытаниях тракторного дизеля 2ЧГД 10,5/12 на ДТ при добавлении LPG к впускному воздуху, когда доля ГГ в смеси с ДТ достигала 24%. В этой работе приведены только концентрации сажи и оксидов азота в ОГ дизеля. Замечено, что при дальнейшем повышении доли LPG возникало детонационное сгорание. В то же время, в работе румынских исследователей [17] соответствующая граничная доля LPG была близкой к 35%. С этим согласуются рекомендации, опубликованные Украинской ассоциацией сжиженного газа [18] (хотя при частичной нагрузке её эксперт допускает долю LPG 75%) и в работе [19].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Определить соотношения ДТ и различных ГГ в рабочей смеси, оптимальные (или близкие к оптимальным) по критерию приведенного удельного выброса токсичных веществ с ОГ дизеля 4ЧНГД 10,4/11,3.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

В качестве дополнительного иллюстративного материала используются результаты, полученные украинскими исследователями [5] при испытаниях дизелей 6ЧН 12/14 на «смесях» ДТ и ПГ с фиксированными соотношениями этих топлив.

Приведенный удельный выброс вредных веществ с ОГ $g_{red(Z)}$ вычисляется как:

$$g_{red(Z)} = \sum_i a_{i(Z)} g_i, \quad (1)$$

где: Z – обозначение способа приведения; $a_{i(Z)}$ – относительный показатель агрессивности i -го вредного вещества; g_i – удельный выброс i -го вредного вещества с ОГ, $г/(кВт \cdot ч)$.

Если выбросы всех вредных веществ приводятся к выбросу CO ($Z = CO$), то показатели агрессивности $a_{i(CO)}$ равны отношениям ПДК CO к ПДК со-

ответствующих веществ, причём для СО этот показатель равен единице. Значения $a_{i(\text{CO})}$ для других веществ, по данным [5, 16], приняты здесь такими:

$$a_{\text{CH}(\text{CO})} = 3,16; a_{\text{NO}(\text{CO})} = 41,1; a_{\text{PM}(\text{CO})} = 200.$$

Часть индекса «PM» обозначает твёрдые частицы (от английских слов particulate matter).

Если выполнять приведение выбросов вредных веществ по В. Азарову [14] ($Z = 1$), то показатели агрессивности $a_{i(1)}$ равны обратным величинам ПДК этих веществ, выраженных в миллиграммах на кубометр: $a_{\text{CO}(1)} = 0,33; a_{\text{CH}(1)} = 6,3; a_{\text{NO}(1)} = 25; a_{\text{PM}(1)} = 50$.

В качестве примера, ниже рассчитаны значения приведенных удельных выбросов вредных веществ с ОГ $g_{\text{red}(\text{CO})}$ и $g_{\text{red}(1)}$ для случая работы дизеля 4ЧН 10,4/11,3 на ДТ при относительной нагрузке 10% [9 – 11]. Значения удельных выбросов вредных веществ, г/(кВт·ч): $g_{\text{CO}} = 0,07; g_{\text{CH}} = 1,7; g_{\text{NO}} = 1,5$.

Сведений о выбросе вредных частиц с ОГ в этих работах не приведено. Соответственно, по формуле (1) получим, г/(кВт·ч): $g_{\text{red}(\text{CO})} = 67,1; g_{\text{red}(1)} = 48,2$.

Как видно, второй способ приведения заметно уменьшает величину $g_{\text{red}(Z)}$, вследствие принятого меньшего показателя агрессивности оксидов азота.

Результаты таких подсчётов представлены в виде точек и кривых на рис. 1 (обозначения пояснены в табл. 1). Дополнительно обработаны данные Парсаданова И.В. [5] о токсичности ОГ дизеля 6ЧН 12/14 для тех режимов, когда относительная нагрузка была близкой к 80% (точки «п»).

Прежде чем определять по рис. 1 оптимальные составы «смесей» ДТ и ГГ, нужно убедиться, что неучёт выброса твёрдых частиц с ОГ при вычислении $g_{\text{red}(Z)}$ существенно не изменит результата. Для этого данные [5] были обработаны как без учёта этого выброса, так и с его учетом. Получилось следующее: для приведения выбросов к СО отношение значения $g_{\text{red}(\text{CO})}$, вычисленного без учёта выброса твёрдых частиц, к значению, вычисленному с учётом этого выброса, находится в пределах 0,91...0,92; для приведения выбросов по В. Азарову это отношение находится в пределах 0,96...0,97 для исследованных режимов работы дизеля 6ЧНГД 12/14. Поэтому можно быть уверенным, что неучёт выброса твёрдых частиц в значениях $g_{\text{red}(Z)}$, показанных на рис. 1, существенно не искажает положение оптимумов составов «смесей» ДТ и ГГ. Изложенное подтверждается результатами работы [20].

Оптимальным составом «смеси» ДТ и ГГ в данном исследовании считается такой, при котором приведенный удельный выброс вредных веществ с ОГ $g_{\text{red}(Z)}$ минимален.

Для «смеси» ДТ и водорода, минимумы $g_{\text{red}(Z)}$ достигаются при таких содержаниях H_2 : при относительной нагрузке дизеля 10% - для $g_{\text{red}(\text{CO})}$ при 50%

водорода, а для $g_{\text{red}(1)}$ при 20%; при относительной нагрузке дизеля 80% – для $g_{\text{red}(\text{CO})}$ и $g_{\text{red}(1)}$ при 10% водорода.

Для «смеси» ДТ и LPG, минимумы $g_{\text{red}(Z)}$ достигаются при таких содержаниях LPG: при относительной нагрузке дизеля 10% - для $g_{\text{red}(\text{CO})}$ при 10...20% LPG, а для $g_{\text{red}(1)}$ при 10%; при относительной нагрузке дизеля 80% – для $g_{\text{red}(\text{CO})}$ и $g_{\text{red}(1)}$ при 50% LPG.

Для «смеси» ДТ и двух ГГ (H_2 и LPG в соотношении 3:7), минимумы $g_{\text{red}(Z)}$ достигаются при таких содержаниях этой смеси ГГ: при относительной нагрузке дизеля 10% – для $g_{\text{red}(\text{CO})}$ и $g_{\text{red}(1)}$ при 30% смеси ГГ; при относительной нагрузке дизеля 80% - для $g_{\text{red}(\text{CO})}$ и $g_{\text{red}(1)}$ при 40% смеси ГГ.

Таким образом, видно, что способ приведения выбросов вредных веществ с ОГ влияет на результат оптимизации состава «смеси» ДТ и ГГ незначительно. Исключение – случай работы дизеля 4ЧНГД 10,4/11,3 с относительной нагрузкой 10% на «смеси» ДТ и водорода. В этом случае, по данным [9 – 11], в диапазоне содержания H_2 25...30% происходит 4-5-кратное увеличение удельного выброса углеводородов с ОГ, показатель агрессивности которых $a_{\text{CH}(1)}$ вдвое больше, чем $a_{\text{CH}(\text{CO})}$. Удельный выброс же оксидов азота при увеличении содержания H_2 в смеси с ДТ от 20 до 50% снижается вдвое и становится меньше удельного выброса углеводородов. Дымность ОГ дизеля, работающего на таких «смесях» топлив, незначительно снижается.

Если сравнить три исследованные «смеси» ДТ и ГГ по уровню минимального удельного приведенного выброса вредных веществ, то на рис. 1 видно, что в целом лучший результат показала «смесь» ДТ с двумя ГГ (водородом и LPG, находящимся в соотношении 3:7). Существенно, что при работе дизеля 4ЧНГД 10,4/11,3 на ней, на уровень $g_{\text{red}(Z)}$ незначительно влияет относительная нагрузка двигателя, чего не было при использовании «смесей» ДТ порознь с H_2 и LPG.

Теперь оценим влияние относительной нагрузки дизеля 4ЧНГД 10,4/11,3 на величину приведенного удельного выброса вредных веществ с ОГ. Как видно на рис. 1, при работе на «смесях» ДТ и с H_2 , и с LPG повышение нагрузки дизеля ведёт к многократному увеличению $g_{\text{red}(Z)}$, так как соответственно возрастает удельный выброс оксидов азота – основного загрязнителя воздуха. Но это увеличение удалось снизить до двукратного и менее, когда в качестве ГГ была использована смесь H_2 и LPG в соотношении 3:7. На ней дизель работал, кроме того, наиболее экономично [9-11]. Следовательно, водород нужно добавлять в общую «смесь» топлив для улучшения протекания сгорания рабочей смеси в цилиндрах дизеля.

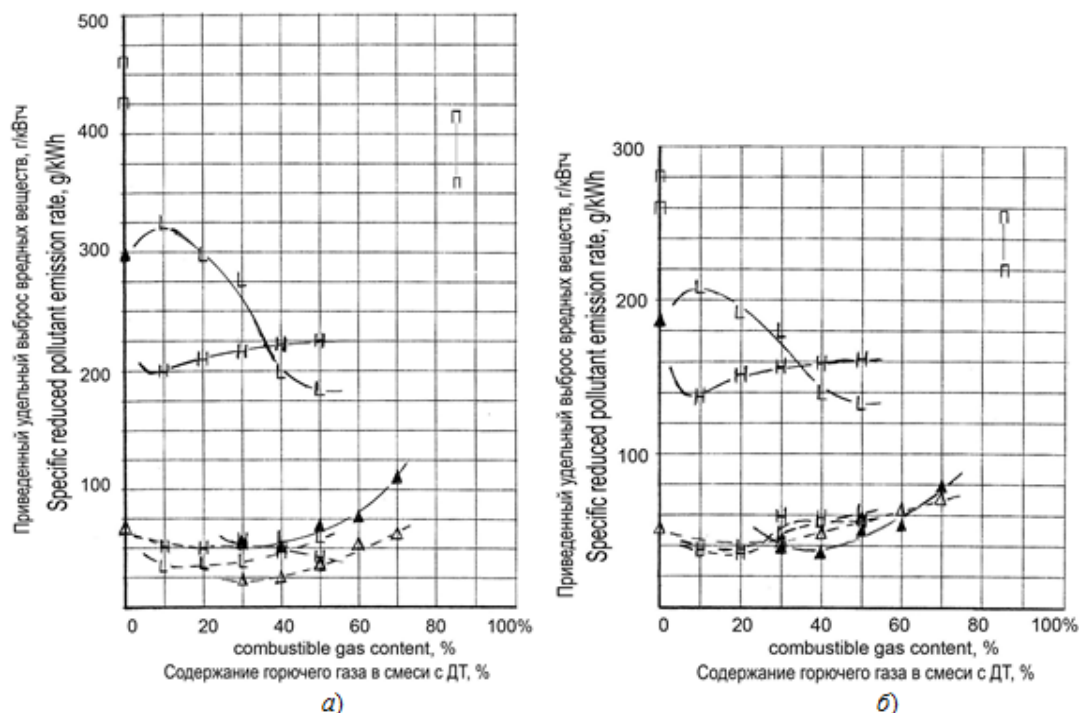


Рис. 1. Зависимости приведенного удельного выброса вредных веществ в ОГ дизелей от содержания горючего газа в смеси с ДТ: *a* – приведение к CO [5]; *б* – приведение по В. Азарову [14]; обозначения точек и линий см. в таблице 1

Fig. 1. Effect of the combustible gas content in the gas-diesel mixture on the diesel engine specific reduced pollutant emission: *a* – reduction to the CO emission [5]; *b* – reduction after V. Arzarov [14]; points and lines are explained in Table 1

Таблица 1. Обозначения линий и точек на рис. 1

Table 1. Notation of lines and points on Fig. 1

Наименование	Обозначения точек					Обозначения линий	
	H	L	Δ	▲	П	-----	-----
Горючий газ	Водород	LPG	Смесь водорода и LPG 3:7*		Природный	H ₂ , LPG, их смесь	
Относительная мощность дизеля N_e/N_{en}	См. обозначения линий		0,1	0,8	0,76...0,82	0,1	0,8

Примечание: * при нулевом содержании ГГ эти точки соответствуют ДТ.

Данные из работы [5] об удельных выбросах вредных веществ с ОГ дизеля 6ЧНГД 12/14 могли использоваться только для случаев его относительной нагрузки, близкой к 80%. Из расположения точек «п» на рис. 1 видно, что работа этого дизеля на «смеси» ДТ и 85% ПГ сопровождалась снижением $g_{red(Z)}$ примерно на 12%, по отношению к случаям использования одного ДТ. Столь большое содержание ПГ объяснялось стремлением сэкономить больше ДТ; задача оптимизации состава «смеси» ДТ и ПГ автором [5] не ставилась. В целом, при сходной относительной нагрузке для дизеля 6ЧН 12/14 величины $g_{red(Z)}$ примерно в 1,5...2 раза выше, чем для дизеля 4ЧНГД 10,4/11,3.

Если сопоставить величины удельных выбросов вредных веществ с ОГ дизеля 4ЧНГД 10,4/11,3 [9–11] и соответствующие европейские нормативы «Еуро» для двигателей грузовых автомобилей и автобусов [14, 16], то можно увидеть следующее.

Удельный выброс CO g_{CO} с ОГ этого дизеля во всех исследованных режимах ниже 1 г/(кВт·ч) и значительно ниже уровня, предписанного нормативами Еуро IV и V; в то же время, повышение содержания ГГ в «смеси» с ДТ ведёт к увеличению g_{CO} . Удельный выброс углеводородов g_{CH} с ОГ изменяется шире, но наиболее близок к нормативу Еуро II - 1,1 г/(кВт·ч) в двух случаях: когда относительная нагрузка дизеля 10% и в качестве ГГ используется 20% H₂, и когда относительная нагрузка 80%, а в качестве ГГ используется 30% смеси H₂ и LPG (3:7). Примечательно, что только в последнем случае величина g_{CH} существенно ниже, чем при использовании одного ДТ. Наконец, удельный выброс оксидов азота g_{NO} с ОГ данного дизеля при относительной нагрузке 10% во всех исследованных случаях намного ниже норматива Еуро V - 2,0 г/(кВт·ч), особенно при использовании 30...40% смеси H₂ и LPG

(3:7), а при относительной нагрузке 80% ξ_{NO} в 1,5...2 раза ниже этого норматива только при использовании 30...50% такой смеси в качестве ГГ. Работа данного дизеля на «смеси» ДТ и либо 10...50% водорода, либо 40...50% LPG с относительной нагрузкой 80% обеспечивает выполнение лишь норматива Euro III.

Что касается нормативов Euro VI [14], то приведенные выводы об удельных выбросах CO и углеводородов остаются справедливыми, а в отношении ξ_{NO} норматив 0,4 г/(кВт·ч) при относительной нагрузке дизеля 80% уже не выполняется во всех исследованных случаях.

Хотя выполненное сопоставление носит качественный характер, так как не рассмотрены выбросы твердых частиц и дизель 4ЧНГД 10,4/11,3 не испытывался в соответствии с требованиями Правил Европейской экономической комиссии (ЕЭК) ООН R49, всё же видно, что использование ГГ, как дополнительного топлива, позволяет значительно уменьшить удельный выброс оксидов азота – основного загрязнителя атмосферы. Тем самым значительно упрощается нейтрализация этого выброса в выпускной системе двигателя. Что касается удельных выбросов продуктов неполного сгорания (CO и углеводородов), то для CO он несущественный, а выделяющиеся углеводороды можно окислить или дожечь каким-либо способом. Необходимость этого видна также из результатов работы [17].

ВЫВОДЫ

1. Результаты оптимизации состава «смесей» ДТ и ГГ по критерию приведенного удельного выброса вредных веществ (ПУВВВ) в исследованной области почти не зависят от использованного способа приведения выбросов этих веществ к выбросу «эталонного» загрязнителя.

2. Как показал анализ данных работы [5] о показателях токсичности ОГ дизеля 6ЧНГД 12/14, удельный выброс твердых частиц, даже с учётом их повышенной агрессивности, составляет менее 10% расчётной величины ПУВВВ. Поэтому последний можно вычислять приближённо, не имея сведений о выбросе этих частиц.

3. Работа дизеля 4ЧНГД 10,4/11,3 с относительной нагрузкой 10% номинальной мощности характеризовалась минимальными значениями ПУВВВ при следующих процентных содержаниях ГГ в их «смесях» с ДТ: водорода – 20% (при приведении выбросов по В. Азарову) и 50% (при приведении выбросов к CO); LPG – 10...20%; смеси водорода и LPG (3:7) – 20...30%.

4. Работа дизеля 4ЧНГД 10,4/11,3 с относительной нагрузкой 80% номинальной мощности характеризовалась минимальными значениями ПУВВВ при следующих процентных содержаниях ГГ в их «смесях» с ДТ: водорода – 10%; LPG – 50%; смеси водорода и LPG (3:7) – 40%.

5. Среди исследованных трёх ГГ, лучшие результаты по уровням ПУВВВ показала смесь водорода и LPG (3:7), причём эти уровни весьма незначительно зависели от относительной нагрузки дизе-

ля. Поэтому водород – это полезная добавка к другим ГГ, используемым совместно с ДТ в дизелях.

Препятствием к использованию водорода пока остаётся его недоступность в обычных газозаправочных сетях. (Хотя сгорание одного водорода могло бы дать повышенный тепловой эффект, в дизелях это невозможно по причине особенности рабочего процесса, использующего эффект самовоспламенения распылённого ДТ.)

6. Использование ГГ совместно с ДТ позволяет существенно снизить удельный выброс основного загрязнителя – оксидов азота с ОГ, что соответственно облегчает их нейтрализацию в выпускной системе дизеля. Выделяющиеся при этом с ОГ несгоревшие углеводороды необходимо окислять или дожигать.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Lejda K., Jaworski A. 2006.** Zasilanie gazowe silników rolniczych // Motrol, 8, 131-138. (Польша)
2. **Lejda K., Jaworski A. 2003.** Problemy zasilanie gazowe silników rolniczych // Motrol, 5, 9. (Польша)
3. **Полищук В., Дубровин В., Полищук А. 2012.** Альтернативные дизельные топлива // Motrol. Vol. 14. No 3. 20-31.
4. **Долганов К.Е. 1991.** Исследование топливной экономичности и токсичности отработавших газов газодизеля // Двигателестроение, 8-9, 6-9.
5. **Парсаданов И.В. 2003.** Повышение качества и конкурентоспособности дизелей на основе комплексного топливно-экологического критерия: Монография. Харьков: Издательский центр НТУ «ХПИ», 244.
6. **Парсаданов И.В. 2002.** Нормирование выбросов вредных веществ дизелей грузовых автомобилей и сельскохозяйственных машин в Украине // Двигатели внутреннего сгорания, 1. 4-7.
7. **Марков В.А., Девянин С.Н., Быковская Л.И. 2013.** Оптимизация состава многокомпонентных смесевых биотоплив для дизельных двигателей сельскохозяйственных машин // Известия вузов. Машиностроение, 12. 51-63.
8. **Poonia M., Ramesh A., Gaur R. 1999.** Experimental investigation of the factors affecting the performance of a LPG - Diesel dual fuel engine // SAE Techn. Pap. Ser., 1999-01-1123, 10.
9. **Ashok B., Ashok S.D., Ramesh Kumar C. 2015.** LPG diesel dual fuel engine - a critical review // Alexandria Engineering J., 54. 105-126.
10. **Lata D.B., Ashok Misra. 2010.** Theoretical and experimental investigations on the performance of dual fuel diesel engine with hydrogen and LPG as secondary fuels // Int. J. of Hydrogen Energy, 35. 11918-11931.
11. **Lata D.B., Ashok Misra, Medhekar S. 2012.** Effect of hydrogen and LPG addition on the efficiency and emissions of a dual fuel diesel engine // Int. J. of Hydrogen Energy, 37. 6084-6096.

12. **Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И. 2002.** Токсичность отработавших газов дизелей. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 376.
13. **Звонов В.А., Козлов А.В., Кутенев В.Ф. 2001.** Экологическая безопасность автомобиля в полном жизненном цикле. М., 248.
14. **Азаров В.К. 2014.** Разработка комплексной методики исследований и оценки экологической безопасности и энергоэффективности автомобилей: Дис...канд. техн. наук / ФГУП НАМИ. М., 137.
15. **Кнеба Z., Skarpetowski B. 2013.** Dual fuelling of truck CI engine with diesel oil and mixture of propane and butane // *Combustion Engines*, 154 (3). 283-290.
16. **Тришкин И.Б. 2014.** Способы и технические средства снижения токсичности отработавших газов дизельных двигателей мобильных энергетических средств при работе в помещениях сельскохозяйственного назначения: Дисс...докт. техн. наук / ФГБОУВПО «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева». Рязань, 544.
17. **Venea B.C., Şoica A.O. 2007.** Researches regarding using LPG on diesel engine // *Annals of the Oradea University*, VI (XVI). 77-85.
18. Украинская ассоциация сжиженного газа. <http://www.uasg.com.ua/en/good-to-know-about-lpg/lpg-autogas/item/466-theory>.
19. **Mohan Kumar K., Azad D. 2014.** An experimental investigation of performance and emissions of LPG as dual fuel in diesel engine generator // *International J. of Engineering Research and Applications*, 4 (11). 41-53.
20. **Поливянчук А.П., Щепак Е.Ю., Титова Е.Ю. 2007.** 145-148. http://www.kpi.kharkov.ua/archive/Наукова_періодика/vestnik/Транспортное_машиностроение/2007/33/Исследование_степени_токсичности_вредных_веществ,_выбросы_которых_нормируются_Европейскими_экологическими_стандартами.pdf.

OPTIMUM BLENDING OF DIESEL AND GASEOUS FUELS BASED ON A CRITERION OF THE SPECIFIC REDUCED POLLUTANT EMISSION

Several publications reporting research of the operation and exhaust gas pollutants of diesel engines at simultaneous burning of diesel fuel (DF) and combustible gas are analyzed. A problem of the optimization of their blending by a criterion of the specific reduced pollutant emission (SRPE) to be minimized is stated.

SRPE is calculated for two methods of reduction on basis of test results for 4ЧН 10,4/11,3 and 6ЧН 12/14 diesel engines. It is plotted versus the percent contents of combustible gas in its blend with DF for two levels of the relative engine power (10 and 80% of the rated power). It is seen that the reduction method affects not shape of constructed plot curves, but the value of SRPE. Analysis of SRPE values calculated for test results of the 6ЧН 12/14 diesel engine reveals that influence of particulate matter emission on the value of SRPE is insignificant.

Burning a blend of DF and two gases (hydrogen and LPG mixed like 3:7), the 4ЧН 10,4/11,3 diesel engine operated most economically and with small SRPE at wide variation of the relative power. For such a blend, minimum SRPE values are achieved: at the relative power of 10% - when the gas mixture contents equal 20...30%; at the relative power of 80% - when the gas mixture contents equal 40%. Burning separate blends of DF and these gases makes engine parameters worse.

Using blends of DF and combustible gases usually allows decreasing specific emission of the main pollutant – nitrogen oxides, thus facilitating their conversion in the diesel exhaust system for fulfilling environmental legislation. However, the specific emission of hydrocarbons increases when burning such blends.

Key words: diesel engine, diesel fuel, combustible gas, pollution, emission.