

УРОВНИ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ ТРАНСПОРТНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Т.А. Стопорева, Н.Н. Грабовская, А.А. Унгефук, Ю.В. Павлова

Рассмотрены уровни вредных выбросов транспортных дизелей конверсионных гусеничных машин. Дан анализ соответствия уровней выбросов ЕВРО-стандартов. Сделаны выводы о необходимости введения каталитической нейтрализации отработавших газов. Приведена методика расчета ущерба, наносимого вредными выбросами дизелей.

Authors have considered the rates of harmful emission of transport diesel of conversion caterpillar. The analysis of corresponding to emission Euro-standard's rates is given in the article. The results of necessity of catalyst neutralization of the exhaust gases are presented. The method of calculation of the damage from harmful emissions of diesel is given in the article.

В процессе конверсии гусеничных машин встает вопрос об оценке характеристик их вредных выбросов с отработавшими газами в атмосферу. Первое противоречие в оценке выбросов в атмосферу связано с тем, что практически все транспортные дизели во время стендовых испытаний проходят оценку по составу отработавших газов по ГОСТ 24585-81 и по дымности отработавших газов – по ГОСТ 24028-80. ГОСТ 24585-81 был привязан к установлению предельно допустимых выбросов (ПДВ) только окислов азота (NO_x) и окиси углерода (СО) в зависимости от удельного эффективного расхода топлива, что нельзя признать объективным, так как транспортный дизель гусеничной машины работает в широком диапазоне частот вращения и нагрузок. Оценка дымности оптическим дымомером по ГОСТ 24028-80 нельзя признать правильной, так как во всем мире оценивается уровень выбросов твердых частиц (ТЧ) с отработавшими газами дизелей.

Конвертируемые гусеничные машины предназначены для многих целей и могут эксплуатироваться в городах, поселках и т.д. Поэтому требуется, в отличие от указанных выше стандартов, другой подход к оценке уровней вредных выбросов. Изучение многопараметровых характеристик вредных выбросов дизелей показывает, что уровни выбросов всех основных нормируемых компонентов: окислов азота, углеводородов, окиси углерода и твердых частиц как по нагрузкам, так и по частотам вращения не подчиняются линейным законам. Для сравнения с Европейскими нормами необходимо вести оценку выбросов в удельных показателях, например, в г/(кВт·ч) и принять для дизелей гусеничных машин один из общепринятых испытательных циклов. Учитывая быстроходность гусенич-

ных машин, таким циклом можно принять 13-режимный испытательный цикл для дизелей грузовых автомобилей (цикл ЕЭК ООН), предусматривающий проведение испытаний дизелей в стендовых условиях.

Это необходимо делать еще и потому, что дизели гусеничных машин – многоцелевые дизели, используемые на грузовых автомобилях и автобусах. Примером этому явилось многоцелевое использование дизелей Д20 НР-250, КамАЗ-740, ЯМЗ-238, испытания которых были проведены в процессе подбора двигателей для конвертируемых машин.

Данные оценки удельных выбросов по 13-ступенчатому испытательному циклу для дизеля Д20НР-250 приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Удельные оценочные выбросы дизеля Д20НР-250 (6Ч15/18) по 13-ступенчатому циклу

Оценочные показатели вредных выбросов	Величины оценочных показателей, г/(кВт·ч)				Превышение норм стандартов ЕВРО-3, ЕВРО-4, ЕВРО-5
	Требования ЕВРО-стандартов			Действительные выбросы	
	ЕВРО-3	ЕВРО-4	ЕВРО-5		
q _{оц. NOx}	5,00	3,50	2,00	13,66	2,73 3,90 6,83
q _{оц. CO}	2,00	1,50	1,50	2,94	1,47 1,96 1,96
q _{оц. CxHy}	0,60	0,46	0,25	0,35	0,58 0,76 1,39
q _{оц. ТЧ}	0,10	0,02	0,02	0,21	2,10 10,50 10,50

Необходимо отметить, что для дизеля Д20НР-250 характерно превышение норм

УРОВНИ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ ТРАНСПОРТНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

стандарта ЕВРО-3 по выбросам СО в 1,47 раза, NO_x – в 2,73 раза, ТЧ – в 2,10 раза.

Нормы стандарта ЕВРО-5, введенного в 2008 году превышаются по выбросам оксидов азота в 6,83 раза, по выбросам оксида углерода – в 1,96 раза, по выбросам углеводородов – в 1,39 раза и по твердым частицам – в 10,5 раз.

Это подтверждает необходимость воздействия на состав отработавших газов через топливо или через нейтрализацию отработавших газов.

Если посмотреть на возможность снижения выбросов окислов азота за счет уменьшения угла опережения начала подачи топлива, исходя из того, что чем меньше угол опережения, тем меньше период задержки воспламенения и максимальная температура сгорания, тем меньше скорость образования окислов азота, то необходимо учитывать, что процесс сгорания сместится по линии расширения, что приведет к ухудшению топливной экономичности и увеличению продуктов неполного сгорания в составе отработавших газов.

Однако такой путь снижения выбросов NO_x не устраивает, так как уже в настоящее время запаса по уровню выбросов СО и ТЧ не существует. Такое мероприятие возможно лишь в случае применения каталитического нейтрализатора на выпуске.

В таблице 2 приведены удельные оценочные выбросы дизеля УТД-29 по 13-ступенчатому циклу.

Таблица 2 – Удельные оценочные выбросы дизеля УТД-29 (10Ч15/15) по 13-ступенчатому циклу

Оценочные показатели вредных выбросов	Величины оценочных показателей, г/(кВт·ч)			Превышение норм стандартов Евро-3, Евро-4, Евро-5	
	Требования Евро-стандартов				Действительные выбросы
	Евро-3	Евро-4	Евро-5		
q _{оц.} NO _x	5,00	3,50	2,00	16,72	3,34 4,78 8,36
q _{оц.} СО	2,00	1,50	1,50	2,33	1,16 1,55 1,55
q _{оц.} С _x Н _y	0,60	0,46	0,25	0,46	0,76 1,00 1,84
q _{оц.} ТЧ	0,10	0,02	0,02	0,21	2,10 10,50 10,50

Из данных таблицы 2 видно, что пользуясь требованиями ОСТ 37.001. 234-81, зада-

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК №1-2 2009

ча снижения вредных выбросов конвертируемых машин могла бы отпасть. Тем более, если воспользоваться требованиями ГОСТ 17.2.2.05-86 для тракторных дизелей. В то же время требования стандартов ЕВРО-3 не удовлетворяются по выбросам СО, NO_x и ТЧ. То, что показатель выполнения требований ЕВРО-3 по выбросам C_xH_y равен 0,76, не дает основания говорить о применении регулировок для решения задачи снижения вредных выбросов с отработавшими газами.

Решение проблемы в уже созданной конструкции энергонасыщенного и высокоэкономичного дизеля путем изменения рабочего процесса не исключается на будущее путем оптимизации размерности, выбора камеры сгорания, степени сжатия, создания вихревого движения заряда в камере сгорания. Однако это возможно на стадии новой серии подобных дизелей.

Наиболее доступным остается путь оснащения серийных дизелей данной конструкции устройствами и системами очистки отработавших газов.

Если сравнивать результаты оценки дизеля ЯМЗ-238БВ с предыдущими оценками дизелей, то следует отметить, что выбросы окислов азота значительны и для дизеля с объемно-пленочным смесеобразованием и в 3,077 раза превышают нормы, установленные стандартом ЕВРО-3. Это объясняется тем, что на данном типе дизеля осуществляется газотурбинный наддув без охлаждения наддувочного воздуха (таблица 3).

Таблица 3 – Удельные оценочные выбросы дизеля ЯМЗ-238БВ (8ЧН13/14) по 13-ступенчатому циклу

Оценочные показатели вредных выбросов	Величины оценочных показателей, г/(кВт.ч)				Превышение норм стандартов ЕВРО-3, ЕВРО-4, ЕВРО-5
	Требования ЕВРО-стандартов			Действительные выбросы	
	ЕВРО-3	ЕВРО-4	ЕВРО-5		
q _{оц.} NO _x	5,00	3,50	2,00	15,35	3,07 4,38 7,67
q _{оц.} СО	2,00	1,50	1,50	1,75	0,87 1,17 1,17
q _{оц.} C _x H _y	0,60	0,46	0,25	0,63	1,05 1,37 2,52
q _{оц.} ТЧ	0,10	0,02	0,02	0,22	2,20 11,0 11,0

Существующие размеры по выбросам СО и допустимые – по C_xH_y могли бы позво-

литель добиться снижения выбросов NO_x путем подбора регулировок впрыска топлива. Однако это приведет к дальнейшему росту количества ТЧ в отработавших газах. Последнее обстоятельство говорит о том, что необходима установка сажевого фильтра или нейтрализатора с фильтром для твердых частиц.

Отказ от газотурбинного наддува, являющегося причиной повышения температуры цикла, обеспечивает тем не менее мощностные и экономические показатели дизеля данной марки. В то же время долговечность и надежность данного типа дизелей подтверждена временем и это нужно учитывать при выборе их для конверсионной гусеничной машины.

Удельные выбросы дизеля КамАЗ-740-10 представлены в таблице 4. Из данных видно, что по выбросам углеводородов дизель незначительно превышает нормы ЕВРО-3, по выбросам окислов азота этот дизель наиболее предпочтителен из рассматриваемых.

Таблица 4 – Удельные оценочные выбросы дизеля КамАЗ-740-10 (8ЧН12/12) по 13-ступенчатому циклу

Оценочные показатели вредных выбросов	Величины оценочных показателей, г/(кВт·ч)				Превышение норм стандартов ЕВРО-3, ЕВРО-4, ЕВРО-5
	Требования ЕВРО-стандартов			Действительные выбросы	
	ЕВРО-3	ЕВРО-4	ЕВРО-5		
q _{оц. NOx}	5,00	3,50	2,00	12,8	2,56 3,66 6,40
q _{оц. CO}	2,00	1,50	1,50	1,45	0,73 0,97 0,97
q _{оц. CxHy}	0,60	0,46	0,25	0,69	1,15 1,50 2,76
q _{оц. ТЧ}	0,10	0,02	0,02	0,23	2,30 11,50 11,50

Все данные говорят о том, что для дизеля КамАЗ-740-10 есть возможность снизить выбросы окислов азота за счет регулировок подачи топлива. При этом рост выбросов СО будет незначительным. Рост выбросов углеводородов не несет ощутимого вреда при комплексной оценке токсичности дизеля, а рост выбросов ТЧ не опасен, так как выбросы ТЧ могут быть устранены за счет установки сажевых фильтров на каждый из рядов цилиндров.

В результате изучения уровней вредных выбросов были построены многопараметровые характеристики. Базовыми точками на них явились точки экспериментальных исследований по 13-режимному циклу, предусмотренному Правилем 49 ЕЭК ООН.

Изучение многопараметровых характеристик вредных выбросов дизелем Д20НР-250 показало, что здесь хорошо видно, что для данного типа дизеля характерны наивысшие уровни выбросов от 2200 до 2600 мин^{-1} при P_e/P_{en} более 0,90. Наименьшие выбросы C_xH_y от 0,012 до 0,07 г/м^3 наблюдаются при $P_e/P_{en}=0,4\ldots 0,9$ и частотах вращения от 1000 до 2200 мин^{-1} . Наиболее высокие уровни выбросов NO_x наблюдаются при 2200...2600 мин^{-1} и $P_e/P_{en}=0,5\ldots 0,9$.

Подобная картина обнаружена при многопараметровых характеристиках, наблюдается и для дизеля УТД-29 с той лишь разницей, что уровни выбросов несколько отличаются по абсолютным значениям.

При анализе данных многопараметровых характеристик вредных выбросов дизелей ЯМЗ-238БВ и КамАЗ-740-10 обращает на себя внимание несколько другая картина распределения выбросов углеводородов в поле характеристик, сдвиг минимумов выбросов C_xH_y в область нагрузок $P_e/P_{en}=0,2\ldots 0,3$.

Наличие многопараметровых характеристик позволяет в дальнейшем при создании различных типов конверсионных гусеничных машин с различными характерными режимами эксплуатации вести расчеты ущерба, наносимого окружающей среде.

Анализ данных таблиц 1-4 показал, что существует необходимость, сохраняя топливную экономичность дизелей, вводить мероприятия по снижению вредных выбросов и, в первую очередь – каталитическую нейтрализацию отработавших газов.

В литературе отмечается, что годовой экономический ущерб от вредных выбросов дизелей можно оценить, располагая сведениями об уровнях вредных выбросов отдельных компонентов, входящих в состав отработавших газов двигателя, характеристике их рассеивания в атмосфере, коэффициентов агрессивности отдельных компонентов выбросов, природно-климатических условий, относительной опасности загрязнения атмосферы.

Существуют методики, предполагающие проведение расчета выброса отдельных вредных веществ в зависимости от количества потребленного дизелем топлива. Такой подход лишен возможности учета совершен-

УРОВНИ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ ТРАНСПОРТНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

ства конструкции дизеля, режимов и продолжительности эксплуатации.

Учеными Д.П. Ананиашвили, Л.А. Барским, К.Г. Гофманом предложено апробированное ранее в работах Р.П. Петриченко (ЛПИ), А.Л. Новоселова, А.А. Мельберт, С.Л. Беседина (АлтГТУ) выражение:

$$W_{oz} = \Omega_{oz} \cdot d_{пкy} \cdot \sigma_p \cdot M_{oz} / R_p, \text{ тыс.руб. в год, } (1)$$

где значение коэффициента $d_{пкy}$ учета природно-климатических условий принимается: для республик Таджикистан, Узбекистан, Кыргызстан, Туркменистан, Азербайджан, Армении, Грузии, Черноморского побережья Кавказа и Крыма $d_{пкy} = 1,40$; для Северного Кавказа, Южного Казахстана, Нижнего Поволжья республик Молдова и Украина $d_{пкy} = 1,20$; для прочих территорий стран СНГ южнее 65° северной широты $d_{пкy} = 1,00$; севернее 65° с.ш. $d_{пкy} = 0,7$; для территорий Сибири и Дальнего Востока $d_{пкy} = 2,00$.

В выражении (1) значение коэффициента σ_p , учитывающего относительную опасность загрязнения атмосферы в зависимости от рельефа местности, принимаются:

- для территорий с плотностью населения менее 1 чел./га $\sigma_p = 0,8$;
- для лесистой местности $\sigma_p = 0,20$;
- для районов обрабатываемых земель южнее 50° с.ш. $\sigma_p = 0,25$;
- для Центрально-Черноземной зоны России $\sigma_p = 0,15$;
- для Южной Сибири $\sigma_p = 0,10$;
- для прочих территорий, включая необрабатываемые земли, тундру и прочие $\sigma_p = 0,025$.

Наиболее сложным моментом является применение константы Ω_{oz} перевода бальной оценки ущерба в экономический. Исходя из реального соотношения цен, в связи с денежными реформами в России и располагая сведениями о величинах Ω_{oz} для СССР: на 1980-85 гг. $\Omega_{oz} = 0,25$ тыс. руб.м²·условную тонну в год, на 1986-1990 гг. $\Omega_{oz} = 0,30$ тыс. руб.м²·усл.тонну в год, сохранение динамики цен в стабильном соотношении курса рубля, на 2000-2010 гг. Ω_{oz} определено как $\Omega_{oz} = 0,35 \cdot 25 = 8,75$ тыс.руб.м²·усл.тонну в год.

Для гусеничных машин, учитывая особенности их конструкций, величину коэффициента рассеивания в атмосфере можно принимать в зависимости от средней скорости ветра $\bar{u}$ на высоте 10 м, высоты трубы h_T по выражению:

$$R_p = \bar{u} \cdot \alpha_{\delta} \cdot h_T + 20 \geq 2,5, \quad (2)$$

где π_p – коэффициент разбавления в приземном слое (до 10м), $\pi_p = 2,00$.

Величина условных выбросов вредных веществ в атмосферу дизелем рассчитывается по выражению:

$$M_{oz} = \sum_{f=1}^f A_f \cdot m_f \cdot \psi_f, \text{ ут/г, } (3)$$

где по расчетам автора, с учетом существующих ПДК по выражению:

$$A_f = \sqrt{\frac{\text{ПДК}_{\text{сум.СО}} \cdot \text{ПДК}_{\text{р.з.СО}}}{\text{ПДК}_{\text{сум.}} \cdot \text{ПДК}_{\text{р.з.}}}}, \quad (4)$$

были получены значения коэффициентов агрессивности основных нормируемых по выбросам веществ:

$$A_{CO}=1; \quad A_{NOx}=49; \quad A_{CH_4}=1,26; \quad A_{TCH_4}=41,5; \\ A_{BAП}=12,6 \cdot 10^3; \quad A_{SO_2}=22; \quad A_{\text{пары масел}}=28,4.$$

Расчет годовых выбросов f -го компонента производится для дизелей без наддува по выражению:

$$m_f = 15,03 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{T_0 \cdot T_r}{P_0 \sum_{m=1}^m G_{Tm} \cdot \alpha_m + 0,0675 \cdot \tau_m \cdot c_{fm}}, \quad (5)$$

тонн в год,

для дизелей с газотурбинным наддувом:

$$m_f = 15,03 \cdot 10^{-12} \cdot T_r \sum_{m=1}^m G_{Tm} \frac{T_{Km}}{P_{Km}} \cdot \alpha_m + 0,0675 \cdot \tau_m \cdot c_{fm}, \quad (6)$$

тонн в год
где T_0 , T_K – температура окружающей среды и температура после компрессора, К; P_0 , P_K – давление окружающей среды и давление после компрессора, МПа; T_r – средняя годовая продолжительность эксплуатации гусеничной машины, часов, $T_r = 1350$ часов в год; m – количество характерных режимов; G_{Tm} – часовой расход топлива на m -м режиме эксплуатации; c_{fm} – выбросы f -го вещества на m -м режиме, г/м³; α_m – коэффициент избытка воздуха на m -м режиме эксплуатации.

В формуле (3) остается неопределенным коэффициент ψ_f увеличения опасности одних веществ в присутствии других, односторонних по воздействию на организм человека. Учитывая, что в составе отработавших газов присутствует до 1200 компонентов, в литературе определены следующие значения ψ_f :

$$\psi_{NOx}=3; \quad \psi_{CO}=1,55; \quad \psi_{CH_4}=1,30; \quad \psi_{TCH_4}=1,1.$$

А.Л. Новоселовым вместо коэффициентов $d_{пкy}, \sigma_p$, R_p , сведения о которых можно

найти в справочной литературе, предложено использовать приведенный коэффициент рассеивания, представляющий собой экспоненциальную функцию, учитывающую как условия рассеивания вредных веществ в атмосфере, так и скорость движения транспортного средства:

$$\bar{R}_{pf} = \exp \left(A \frac{c_{fm}}{c_{f \max}} + B \right), \quad (7)$$

где $c_{f \max}$ - максимальная концентрация f -го компонента ОГ вблизи почвы; c_f - концентрация f -го компонента ОГ на выходе из трубы, A и B - коэффициенты, приведенные в таблице 5.

Таблица 5 – Коэффициенты для определения рассеяния вредных компонентов ОГ в атмосфере

Компоненты ОГ	Коэффициенты в выражении (7)	
	A	B
Оксиды азота	$0,1822 \cdot 10^{-5}$	1,3860
Оксид углерода	$0,0383 \cdot 10^{-3}$	1,3001
Углеводороды	0,0442	1,3146
Сажа	$0,07442 \cdot 10^{-5}$	1,3572

Расчет максимальных концентраций вредных веществ ведется по выражениям: для токсичных веществ:

$$c_{f \max} = \frac{15,0328 \cdot 10^{-5} \cdot K_m \cdot \bar{G}_T \cdot T_K \cdot c_f}{\pi \cdot S_{uy} \cdot S_{uz} \cdot \bar{y} \cdot P_K \cdot \bar{V}_g \cdot x^{z-r}} \cdot \exp \left[-\frac{1}{x^{z-r}} \left(\frac{y^r}{S_{uy}^r} + \frac{H^z}{S_{uz}^r} \right) \right], \quad \text{г/м}^3, \quad (8)$$

для сажи:

$$c_{c \max} = \frac{88,24 \cdot 10^{-3} \cdot K_m \cdot \bar{G}_T \cdot T_K \cdot f_p}{S_{uy} \cdot S_{uz} \cdot \bar{y} \cdot P_K \cdot \bar{V}_g \cdot x^{z-r}} \cdot \exp \left[-\frac{1}{x^{z-r}} \left(\frac{y^r}{S_{uy}^r} + \frac{H - \frac{x \cdot f_p}{\bar{y}}}{S_{uz}^r} \right) \right], \quad \text{г/м}^3, \quad (9)$$

где $\bar{V}_g$ - приведенная скорость движения $\bar{V}_g = \exp(0,039 \cdot V_g - 0,9146)$; K_m - коэффициент турбулентной вязкости; x, y, z - координаты точки максимальной концентрации; r - коэффициент атмосферной стратификации; S_{uy} , S_{uz} - коэффициенты Сеттона, характеризующие местную турбулентность атмосферы; H - высота подъема струи ОГ, м; f_p - скорость осаждения сажи, м/с.

Высоту подъема струи для каждого из компонентов рассчитывают по выражениям: при $H = H_f + \Delta H$, м,

$$\Delta H_f = \frac{4,77}{1 + 0,43 \bar{u} / V_s} - \frac{\sqrt{Q_{ci} \cdot V_s}}{\bar{u}} + 6,37 \frac{Q_{ci} \cdot \Delta}{\bar{u}^3 \cdot T_{gz}} \left(\ln J^2 + \frac{2}{J} - 2 \right), \quad \text{м} \quad (10)$$

$$\text{где } J = \frac{\bar{u}^2}{\sqrt{Q_{ci} \cdot V_c}} \cdot \left(0,43 \sqrt{\frac{T_1}{g \cdot B_n}} - \frac{0,28 \cdot V_s \cdot T_1}{g \cdot \Delta} \right),$$

$$\Delta H_c = \frac{1,5 \cdot V_c \cdot d_T + 4,1 \cdot 10^{-2} \cdot g_n}{\bar{u}}, \quad \text{м}$$

где V_s - скорость газа в устье трубы, м/с; Q_{ci} - расход ОГ при температуре T_1 , м³/с; $\Delta = T_1 - T_a$; T_{gz} - температура ОГ за системой наддува, К; g - ускорение силы тяжести; T_1 - температура, при которой удельный вес компонента и воздуха равны, К; B_n - вертикальный градиент потенциальной температуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ананишвили, Д. П. Охрана окружающей среды: модели социально-экономического прогноза / Д.П. Ананишвили, Л.Г. Барский, К. Гофман. - М.: Экономика, 1982. - 224 с.
2. Малов, Р. В. Автомобильный транспорт и защита окружающей среды / Р.В. Маслов, В.М. Ерохов, В.А. Щетина. - М.: Транспорт, 1982. - 200 с.
3. Мельберт, А. А. Применение экологической безопасности поршневых двигателей. - Новосибирск: Наука, 2003. - 170 с.
4. Новоселов, А. Л. Применение СВС-материалов при решении экологических проблем транспорта / А.Л. Новоселов, А.А. Мельберт, А.А. Жуйкова. - Новосибирск: Наука, 2007. - 168 с.
5. Новоселов, А. Л. Снижение вредных выбросов дизелей / А.Л. Новоселов, А.А. Мельберт, А.А. Жуйкова. - Новосибирск: Наука, 2007. - 139 с.