

## К ВОПРОСУ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ «НАГРУЗКИ» ШЕЛКОВОГО ПУТИ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

В.С. Кукис, Е.А. Омельченко, Ю.А. Постол

**Аннотация.** В статье приведены уравнения регрессии, позволяющие оценивать влияние доли рециркулируемых газов в свежем заряде, степени снижения температуры рециркулируемых газов, скоростного и нагрузочного режимов работы двигателя на выбросы вредных веществ с отработавшими газами дизелей, являющихся основными силовыми установками транспортных средств, которые будут использоваться в случае реализации «Шелкового пути».

**Ключевые слова:** вредные вещества, отработавшие газы, дизель, «Шелковый путь»

Человечество как биологический вид и социальная общность неразрывно связано с процессами, происходящими в окружающей среде, и во всех возрастающих масштабах черпает из нее ресурсы, загрязняет отходами, продуктами жизнедеятельности. Все происходит в тончайшем слое «жизненного пространства» – биосфере.

Как известно, в основе реализации наземной части «Шелкового пути» лежит строительство трех железнодорожных коридоров (северный, центральный и южный), которые впоследствии станут основой для развития других видов транспорта, в том числе автомобильного. У Российской Федерации и Китая уже есть ряд масштабных проектов в транспортной сфере, которые могут быть интегрированы в проект «Пути». Например, страны строят новую автодорогу из Европы через Россию в Азию, которую президент РФ назвал «трансевроазиатской магистралью».

Материалы таблицы 1 характеризуют загрязнение атмосферы в результате деятельности транспорта [1].

Из данных таблицы видно, что именно наземный транспорт доминирует в загрязнении атмосферы. Если считать, что автозаправочные станции и дороги как факторы загрязнения, также связаны с наземным транспортом, то на все виды наземного транспорта с его инфраструктурой приходится до 93 % загрязняющих атмосферу веществ.

Таблица 1 – Выделение вредных веществ в атмосферу в результате деятельности транспорта (млн. т.) (в скобках приведено относительное содержание каждого компонента в процентах от его общего количества)

<i>Источники загрязнений</i>	<i>CO</i>	<i>NO<sub>x</sub></i>	<i>SO<sub>x</sub></i>	<i>CH</i>	<i>Твердые частицы</i>	<i>Итого</i>
Наземный транспорт	81,5 (97,3)	9,5 (96,4)	0,7 (0,5)	9,2 (83,6)	6,1 (17,0)	107,0 (75,7)
Воздушный транспорт	0,9 (1,1)	0,1 (1,0)	0,01 (1,1)	0,2 (1,8)	0,07 (0,2)	1,3 (0,9)
Водный транспорт	1,4 (1,7)	0,2 (2,0)	0,2 (2,2)	0,5 (4,5)	0,04 (0,1)	2,4 (1,7)
Автозаправочные станции	-	-	-	1,1 (10,0)	-	1,1 (0,08)
Автомобильные дороги	-	-	-	-	29,7 (83,0)	29,7 (20,6)
<b>В с е г о</b>	<b>83,8</b>	<b>9,8</b>	<b>0,9</b>	<b>11,0</b>	<b>35,9</b>	<b>141,4</b>

Учитывая то, что, как отмечалось выше, для реализации наземной части «Шелкового пути» предстоит строительство трех железнодорожных коридоров и широкое использование автомобильного транспорта следует признать, что реализация «Шелкового пути» создаст существенную «нагрузку» на экологическую обстановку в тех регионах, через которые он будет проходить.

Деятельность железнодорожного транспорта в наибольшей степени отражается на атмосфере в районах, где в качестве локомотивов эксплуатируются тепловозы с дизельными силовыми установками. Тепловозной тягой выполняются перевозки пассажиров и грузов, а также маневровые работы на станциях и путях промышленного железнодорожного транспорта. Ос-

новным источником загрязнения атмосферы при работе подвижного состава являются отработавшие газы тепловозов [2]. При этом следует иметь в виду, что в настоящее время основным видом тяги на промышленном транспорте является именно тепловозная, осуществляющая свыше 80% общего объема перевозок [3].

Совершенно очевидно, что и в процессе перевозки грузов автомобильным транспортом (который в качестве силовой установки использует практически только поршневые двигатели внутреннего сгорания и преимущественно дизельные) должно обеспечиваться соблюдение установленных экологических норм и требований.

Анализ различных мероприятий по снижению количества вредных выбросов (качественное изменение рабочих процессов в поршневых ДВС и систем их регулирования; использование альтернативных топлив и присадок к ним; рециркуляция отработавших газов; установка нейтрализаторов) показывает, что для обеспечения соответствия дизелей действующим и перспективным нормам по токсичности целесообразно использование методов снижения выбросов вредных веществ поршневыми ДВС, включающих сочетание систем рециркуляции отработавших газов с охлаждением рециркулируемых газов и нейтрализации отработавших газов.

Заметим, что применение систем рециркуляции отработавших газов и их нейтрализации показывает, что эффективность использования указанных способов существенно зависит от температуры рециркулируемых газов и температуры отработавших газов (при этом вредны как малые, так и чрезмерно высокие ее значения). Однако большую часть времени силовые установки мобильной техники работают на переменных скоростных и нагрузочных режимах. В результате температура отработавших газов (а значит и рециркулируемых газов) колеблется в широких пределах (от 120 до 750 0С и выше), что создает проблему обеспечения оптимальной реализации указанных способов повышения экологической безопасности ПДВС.

В настоящей статье приводятся результаты экспериментальных исследований (в которых для охлаждения рециркулируемых газов и стабилизации температуры отработавших газов перед каталитическим нейтрализатором впервые в практике двигателестроения применена вихревая труба [4] (рисунок 1)) по определению влияния доли рециркулируемых газов в свежем заряде и их температуры на выбросы вредных веществ дизелем, размерностью 13/15, в основу которых была положена математическая модель, связывающая доли рециркулируемых газов в свежем заряде, их температуру, скоростной и нагрузочный режимы работы дизеля с содержанием вредных веществ.

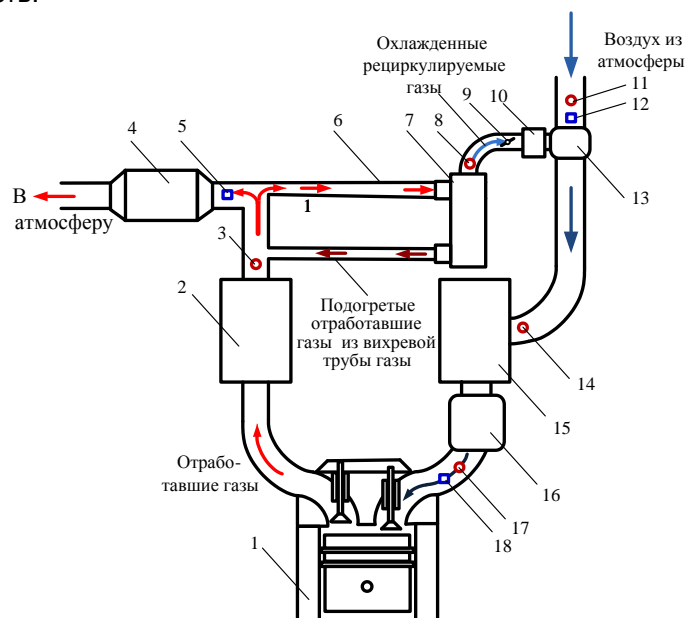


Рис. 1. Схема системы рециркуляции и нейтрализации отработавших газов:

1 – дизель; 2 – газовая турбина; 3, 8, 11, 17 – точки замера температуры; 4 – каталитический нейтрализатор, 5, 12, 18 - точки замера давления; 6 – патрубок подвода отработавших газов к вихревой трубе; 7 – вихревая труба; 9 – заслонка, регулирующая объём рециркулируемого газа; 10 – расходомер; 13 – смеситель газов; 15 – компрессор, 16 – охладитель наддувочного воздуха

Возможность моделирования количества вредных веществ, выбрасываемых с отработавшими газами силовых установок транспортных средств, предполагаемых для использования на наземной части «Шелкового пути», позволит составить предварительное представление об экологической «нагрузке» от реализации этого проекта.

Для оценки влияния указанных выше факторов на названные выходные функции был использован статистический метод планирования эксперимента, в основе которого лежала идея «черного ящика» [5]. Под «черным ящиком» понимается принцип изображения процессов в виде кибернетической модели с входными управляемыми, контролируруемыми и неконтролируемыми факторами. Такой кибернетический подход позволяет на основании экспериментальных данных не только построить математическую модель процесса, связывающую функции отклика с варьируемыми факторами, но и управлять им при недостаточном знании самого происходящего явления. Очевидно, что такая математическая модель, являясь особой формой абстрагирования, естественно, не тождественна изучаемому процессу, а лишь аналогична ему.

В качестве функций отклика в настоящей работе служили вредные вещества, выбрасываемые с отработавшими газами в окружающую среду. Исходя из того, что индекс токсичности твердых частиц в два раза выше, чем оксидов азота, в 10 раз – чем углеводородов и в 20 раз – чем оксида углерода [6], а коэффициенты агрессивности оксидов азота (49,0) и твердых частиц (41,5) намного превосходят коэффициенты агрессивности углеводородов и оксида углерода (1,26 и 1,0 соответственно) [7] при выборе функций отклика авторы ограничились именно этими компонентами.

Таким образом, в экспериментах устанавливалась зависимость содержания твердых частиц (PM) и оксидов азота (NO<sub>x</sub>) от четырех факторов:

1. Доли рециркулируемых отработавших газов в свежем заряде.
2. Температуры рециркулируемых отработавших газов.
3. Частоты вращения коленчатого вала двигателя.
4. Нагрузки на двигатель.

Для возможности последующего обобщения экспериментального материала перечисленные факторы рассматривались в относительной форме:

1. Объемная доля рециркулируемых газов в свежем заряде -  $\bar{V}_{\text{ог пер}} = V_{\text{ог пер}} / V_{\text{св.з.}}$ , где  $V_{\text{ог пер}}$  - объемный расход рециркулируемых отработавших газов, м<sup>3</sup>/ч;  $V_{\text{св.з.}}$  - объемный расход свежего заряда, м<sup>3</sup>/ч.

2. Степень снижения температуры рециркулируемых газов в вихревой трубе -  $\Delta \bar{t}_{\text{ог пер}} = (t_{\text{ог}} - t_{\text{ог пер}}) / t_{\text{ог}}$ , где  $t_{\text{ог пер}}$  - температура охлажденных рециркулируемых газов после вихревой трубы, °С;  $t_{\text{ог}}$  - температура отработавших газов перед вихревой трубой, °С.

3. Относительная частота вращения коленчатого вала двигателя ( $\bar{n} = n_i / n_{\text{ном}}$ ), где  $n_i$  - текущая частота вращения коленчатого вала, мин<sup>-1</sup>,  $n_{\text{ном}}$  - частота вращения коленчатого вала, соответствующая номинальной мощности мин<sup>-1</sup>.

4. Относительная нагрузка на двигатель -  $\bar{M}_{\text{кр}} = M_{\text{кр } i} / M_{\text{Не}}$ , где  $M_{\text{кр } i}$  - текущий крутящий момент, Н·м;  $M_{\text{Не}}$  - крутящий момент, измеренный при номинальной мощности, Н·м.

В результате кибернетическая модель рабочего процесса в цилиндре двигателя приняла вид, показанный на рисунке 2.

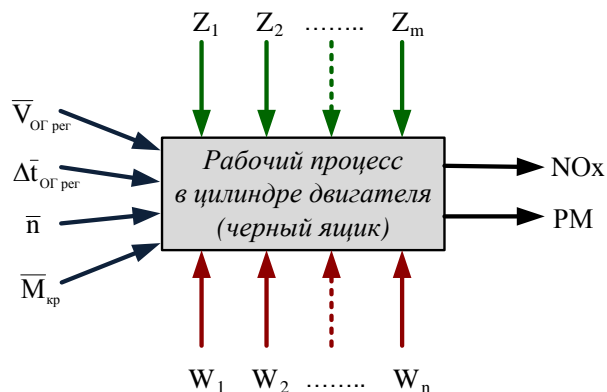


Рис. 2. Конкретизированная кибернетическая модель рабочего процесса в цилиндре двигателя ( $Z_1, Z_2, \dots, Z_m$  – контролируемые факторы, значение которых можно контролировать или поддерживать на определенных уровнях;  $W_1, W_2, \dots, W_n$  – неконтролируемые факторы)

Натуральные значения уровней факторов переводили в кодовые по формулам [8]:

$$X_i = \frac{x_i - x_{i0}}{\Delta x_i},$$

где  $X_i$  - кодовое значение  $i$ -го фактора;  
 $x_i$  - натуральное текущее значение  $i$ -го фактора;  
 $x_{i0}$  - начальный (нулевой) уровень  $i$ -го фактора;  
 $\Delta x_i$  - интервал варьирования  $i$ -го фактора.

$$\Delta x_i = \frac{x_{i\max} - x_{i\min}}{2}.$$

Объемная доля рециркулируемых газов в свежем заряде была обозначена кодовым значением  $X_1$ , степень снижения температуры рециркулируемых газов в вихревой трубе -  $X_2$ , относительная частота вращения коленчатого вала двигателя -  $X_3$  и относительная нагрузка на двигатель -  $X_4$ .

Принятые уровни и интервалы варьирования всех факторов представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Уровни и интервалы варьирования факторов

Факторы			Уровни варьирования			
Наименование	Обозначение		Кодовые			Интервалы варьирования
	Натуральное	Кодовое	-1	0	1	$\Delta x_i$
			Натуральные			
Объемная доля рециркулируемых газов в свежем заряде	$\bar{V}_{\text{ог пер}}$	$X_1$	0,00	0,09	0,18	0,09
Степень снижения температуры рециркулируемых газов в вихревой трубе	$\Delta \bar{t}_{\text{ог пер}}$	$X_2$	1,000	0,94	0,88	0,06
Относительная частота вращения коленчатого вала двигателя	$\bar{n}$	$X_3$	0,378	0,689	1,000	0,311
Относительная нагрузка на двигатель	$\bar{M}_{\text{кр}}$	$X_4$	0,52	0,76	1,00	0,24

При планировании данного эксперимента ставилась задача определения математических моделей в виде уравнений первого порядка, адекватно описывающих изменение содержания твердых частиц и оксидов азота в функции перечисленных выше факторов.

В результате обработки данных эксперимента были найдены регрессионные зависимости функций отклика от факторов, оказывающих влияние на содержание оксидов азота и твердых частиц в обработавших газах:

- для определения содержания оксидов азота:

$$\text{NO}_x = 61.462 - 11,925 X_1 + 19,212 X_2 + 55,988 X_3 + 25,737 X_4 - 11,700 X_1 X_3 + 17,538 X_2 X_3 + 24,087 X_3 X_4 \quad (1)$$

- для определения массового потока твердых частиц:

$$PM = 73,038 - 33,737 X_1 - 2,212 X_2 - 44,100 X_3 + 8,975 X_4 + 40,475 X_1 X_3 - 7,575 X_1 X_4 \quad (2)$$

Адекватность уравнений (1) и (2) проверяли с использованием критерия Фишера при заданном уровне значимости  $q=5\%$ .

Расчеты показали, что  $F_{расч} = 4,8$  для зависимости (1) и  $F_{расч} = 9,4$  для выражения (2). Табличное значение критерия Фишера для имевших место степеней свободы  $F_{кр} = 19,4$ . Как видно,  $F_{расч}$  в обоих случаях меньше  $F_{кр}$ . Таким образом, гипотеза адекватности полученной математической модели для расчета содержания оксидов азота (в ppm) и твердых частиц (в г/ч) в зависимости от: объемной доли рециркулируемых газов в свежем заряде; степени снижения температуры рециркулируемых газов в вихревой трубе; относительной частоты вращения коленчатого вала двигателя и относительной нагрузки на двигатель нашла подтверждение с вероятностью совпадения результатов расчета и эксперимента не менее чем в 95 % случаев.

Таким образом, полученные зависимости могут быть достоверно использованы для получения предварительного представления об экологической «нагрузке» на ОС от наиболее агрессивных ВВ, выбрасываемых в атмосферу силовыми установками тепловозного и автомобильного транспорта, при реализации «Шелкового пути»..

#### Библиографический список

1. Новиков Ю.В. Экология, окружающая среда и человек: Учеб. пособ. для вузов, средних школ и колледжей / Ю.В. Новиков. - М.: ФАИР-ПРЕСС, 2000. - 320 с.
2. Малов Н. Н. Охрана окружающей среды на железнодорожном транспорте / Н.Н. Малов, Ю.И. Коробов. - М.: Транспорт, 2004. - 238 с.
3. Железнодорожный транспорт: Научно-теоретический технико-экономический журнал / Орган Министерства Путей Сообщения. - М. : Транспорт. 2006. - № 2. - С. 60-65.
4. Кукис В.С. Влияние рециркуляции и нейтрализации отработавших газов на экологические показатели дизеля / В.С. Кукис, Е.А. Омельченко // Materials of IX international research and practice conference «Fundamental and applied science» (October 30-November 7, 2014.V. 18. Technical science). Sheffield UK, 2014. - P.26-30.
5. Спирин Н.А. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента: Конспект лекций / Н.А. Спирин, В.В. Лавров. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2004. - 257 с.
6. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 30.05.2003 № 114 (ред. от 03.11.2005) «О введении в действие ГН 2.1.6.1338-03» (вместе с «Гигиеническими нормативами «Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест. ГН 2.1.6.1338-03», утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 21.05.2003) (Зарегистрировано в Минюсте РФ 11.06.2003 № 4679).
7. Григорьева Т.Ю. Оценка ущерба, наносимого вредными выбросами с отработавшими газами дизелей / Т.Ю. Григорьева, Е.М. Артеменко, Е.И. Кибяков // Повышение экологической безопасности автотракторной техники. Барнаул, 2001. - С. 124-138.
8. Разоренов Г. И. Выбор масштабов при моделировании. – М.: Советское радио, 1973, - 160 с.

**Abstract.** The article shows the regression equation, allowing to assess the impact of the proportion of recycled gases in the fresh charge, reducing the temperature of the recycled gases, speed and load modes of engine operation on the emissions of harmful substances with exhaust gases of diesel engines, which are the main propulsion systems of vehicles which will be used in case of realization of the "Silk road".

**Keywords:** harmful substances, exhaust gases, diesel engine, «Silk road».

Информация об авторах. Места работы всех авторов, их должности и контактная информация (если есть электронные адреса, обязательно указать их).

**Кукис Владимир Самойлович**, профессор кафедры «Колесные и гусеничные машины» Южно-Уральского автономного государственного университета (Национального исследовательского университета), тел. +7 912 895 0828, email: idem37@mail.ru.

**Омельченко Евгений Алексеевич**, начальник кафедры «Вождение бронетанковой и автомобильной техники» Омского автобронетанкового инженерного института, тел. +7 913 628 3784, email: [veraomelchenko97@mail.ru](mailto:veraomelchenko97@mail.ru).

**Постол Юлия Александровна**, доцент кафедры “Электротехнология и тепловые процессы”  
Таврического государственного агротехнологического университета, тел.+3 80975803001, email:  
yulia42111@yandex.ru