

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ВИДОВ ТОПЛИВА В АГРОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ

Ерохов В.И.

Московский политехнический университет, г Москва, Российская Федерация

Аннотация. Кратко изложена концепция разработки моделей и механизма образования сажи и оксидов азота при сгорании углеводородных топлив энергетических установок транспортных средств агропромышленного комплекса. Проведен анализ выброса диоксида углерода и сажи в современных условиях развития агропромышленного комплекса. Приведена принципиальная схема системы питания транспортных средств на АВТ. Проанализированы результаты экологических характеристик двигателя при использовании восстановителя оксидов азота (мочевина). Дана оценка относительной эффективности транспортных средств при использовании альтернативных видов топлива.

Ключевые слова: парниковый эффект, дымность, твердые частицы, мочевина, сажа, газодизель, мочевина, компримированный природный газ, сажевый фильтр, нейтрализатор, оксиды азота.

THE EFFECTIVENESS OF ALTERNATIVE FUELS IN AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX

Yerokhov V. I.

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation

Annotation. The concept of developing models and mechanisms for the formation of soot and nitrogen oxides during the combustion of hydrocarbon fuels of power plants of agricultural vehicles is briefly described. The analysis of carbon dioxide and soot emissions in modern conditions of development of the agro-industrial complex is carried out. A schematic diagram of the power supply system for vehicles on the BUS is given. The results of environmental characteristics of the engine when using a reducing agent of nitrogen oxides (urea) are analyzed. The relative efficiency of vehicles using alternative fuels is estimated.

Keywords. greenhouse effect, smokiness, solid particles, urea, soot, gas diesel, urea, compressed natural gas, soot filter, neutralizer, nitrogen oxides.

Обеспечение АТ эффективными и стабильными энергоносителями агропромышленного комплекса представляет собой одну из важнейших задач национальной экономики. Во многих странах разработаны и реализуются программы применения альтернативных видов топлива (АВТ). Ведущее место занимает компримированный природный газ (КПГ).

Сгорание углеводородного топлива сопровождается выбросом парниковых газов [1]. Углеродное число (соотношение $C:H$), характеризующее склонность топлива к образованию диоксида углерода (CO_2) и C (сажи) дизельного топлива (ДТ) составляет 6,7, а сжиженный углеводородный газ (СУГ) и природный газ (ПГ) – соответственно 4,9 и 2,99. Оптимальный газовый состав атмосферного воздуха содержит 0,03 % (объем) CO_2 , а фактический состав – 0,042 %.

Целью работы является повышение эффективности эксплуатации транспортных средств агропромышленного комплекса при работе на АВТ.

Задачей исследования является проведение анализа методов снижения сажи, оксидов азота углекислого газа транспортных средств агропромышленного комплекса.

Технологические транспортные средства агропромышленного комплекса по ряду причин характеризуются повышенным выбросом сажи. Сажевые частицы обладают исключительно высоким свойством адсорбирования канцерогенных веществ (бензапирена $C_{20}H_{12}$).

Структура углеводородного топлива заметно влияет на выброс сажи, содержание которой в ОГ возрастает при увеличении углеродного числа. Выброс $C_{Tч}$ может быть представлен зависимостью:

$$C_{Tч} = 1,02C_c + 0,277C_T C_{п}, \text{ мг/м}^3 \quad (1)$$

где C_c – содержание углерода в ОГ, г/м³; C_T – содержание углерода в топливе, %; $C_{п}$ – содержание углерода в смеси, %.

Схематичная реакция адсорбции C_2H_2 на поверхности образовавшейся частицы сажи имеет вид:



Разработана принципиальная схема и обоснован механизм взаимозависимости выбросов сажи и оксидов азота. Повышение термических и энергетических показателей HTC сопровождается увеличением выброса оксидов азота. Снижение упомянутых показателей сопровождается повышенным выбросом сажи.

Система нейтрализации $ОГ$ современных дизелей содержит селективный каталитический преобразователь « SCR » (Selective Catalytic Reduction), состоящий из каталитического нейтрализатора в виде сотовой структуры, и системы « $DeNO_x$ », представляющей устройство дозирования в выпускной трубопровод аммиачного заменителя « $AdBlue$ ».

Модель формирования сажевых частиц в общем виде может быть представлена зависимостью:

$$dm_{c\text{обр}}/dt = A_T m_T P^{0.5} \exp\left(-\frac{E_T}{RT}\right) \quad (3)$$

где m_T и $m_{c\text{обр}}$ – масса топлива и сформировавшейся сажи; A_T – константа топлива; E_T – энергия активации реакций формирования сажи $E_T = 5,2 \cdot 10^4$ (Дж/моль); R – универсальная газовая постоянная; p, T – давление и температура в цилиндре двигателя.

Расчетные соотношения скорости образования сажи в зоне горения зависят от текущего объема цилиндра; цикловой подачи топлива и скорости тепловыделения.

Скорость образования сажи пропорциональна исчезновению жидких капель вследствие их полного испарения. Одновременно с образованием сажи протекает процесс выгорания сажевых частиц.

Модель окисления сажевых частиц в общем виде может быть представлена зависимостью:

$$dm_{c\text{выг}}/dt = A_C m_{c\text{обр}} O_2 P^{1.8} \exp\left(-\frac{E_C}{RT}\right) \quad (4)$$

где $m_{c\text{выг}}$, $m_{c\text{обр}}$ – массы окислившейся и сформировавшейся части топлива; A_C – константа, определяемая характером образовавшейся части сажевых частиц, E_C – энергия активации реакций окисления сажи $E_C = 5,8 \cdot 10^4$ (Дж/моль); $[O_2]$ – мольная концентрация кислорода в продуктах сгорания.

Скорость изменения массы сажи может быть представлена зависимостью:

$$dm_c/dt = dm_{c\text{обр}}/dt - dm_{c\text{выг}}/dt \quad (5)$$

где m_c , $m_{c\text{обр}}$, $m_{c\text{выг}}$ – массы топлива, сформировавшейся и выгоревшей (окислившейся) сажи.

Образование сажи основано на химическом преобразовании молекул топлива в молекулы ацетилена (C_2H_2), представляющего конечный продукт цепных реакций, предшествующих образованию свободного углерода и ростом числа атомов ядер сажи.



Фундаментальным положением моделей образования сажи является образование первичных частиц сажи (ядер) $d[z]/dt$, содержание которых пропорционально концентрации ацетилена C_2H_2 , образующегося в результате пиролиза топливных молекул при частичном недостатке кислорода.

Скорость зарождения ядра сажи $d[z]/dt$ может быть определена на основе фундаментального положения пропорциональной величины образования предшественника сажи – ацетилена (C_2H_2) из выражения:

$$\frac{d[z]}{dt} = 1,0 \cdot 10^4 \exp\left(\frac{21,100}{T}\right) [C_2H_2], \text{ моль}/(\text{см}^3 \cdot \text{с}) \quad (7)$$

Перевод полученного значения концентрации сажи $[C]$, $г/м^3$ в единицы шкалы *Hartridge* (Хартриджа) осуществляется по уравнению:

$$Hartridge = 100[1 - 0,954 \exp(-2,4226[C])] \quad (8)$$

По аналогичным эмпирическим зависимостям концентрация сажи $[C]$ может быть переведена, единицы шкалы «*Bosch*», а также в единицы коэффициента абсолютного светопоглощения K , $м^{-1}$.

Показатели концентрации твердых частиц могут быть вычислены по известной эмпирической формуле в зависимости дымности $ОГ$:

$$[PM] = 565 \left(\ln \frac{10}{10 - Bosch} \right)^{1,206} \quad (9)$$

Относительная эффективность применения $АВТ$ по затратам добычи, транспортировке и переработки первичного энергоносителя, пробега на одной заправке и стоимости единицы пробега HTC наиболее эффективными являются все виды газового топлива – компримированного природного газа ($КПГ$), сжиженного углеводородного газа ($СУГ$) и сжиженного природного газа ($СПГ$).

Для снижения выбросов NO_x наиболее перспективно применение нейтрализатора адсорбционно-каталитического типа « $DeNO_x$ », работающего путем подачи в систему выпуска аммиака (NH_3), мочевины $(NH_2)_2CO$ с молекулярным весом $60,07$ г/моль. Применение мочевины снижает на 100 °С температуру начала химических реакций. Каталитические нейтрализаторы « $DeNO_x$ » работают с подачей в систему выпуска аммиака, высвобождаемого из мочевины $(NH_2)_2CO$.

Принцип действия системы « $DeNO_x$ » заключается в организации химической реакции аммиака с оксидами азота, в результате которой образуется N_2 и H_2O .





Применение аммиака в чистом виде представляет определенные трудности. В ФРГ концерном «Total» на водной основе создан безопасный заменитель аммиака [2]. Аналогичный заменитель разработан в нашей стране. Организован выпуск этой жидкости и получен сертификат качества [3].

Концепция современного ГД с аппаратурой нового поколения разработана на базе микропроцессорной системы управления. В ее основу положено ряд известных положений и технических решений по аналогии с системой «Blue Power Diesel».

При работе двигателя по ГД циклу суммарный часовой расход ДТ и газа определяют по формуле:

$$G_r^\Sigma = \Delta G_{зд} + G_r \left(\frac{H_{и}^r}{H_{и}^{дт}} \right), \text{ кг/ч} \quad (12)$$

где $\Delta G_{зд}$ – часовой расход запальной дозы топлива, кг/ч; G_r – часовой расход газа, кг/ч; $H_{и}^r$ и $H_{и}^{дт}$ и низшая весовая теплотворная способность газа и ДТ, МДж/кг.

Увеличение доли газа в газодизельной смеси в диапазоне 0-80% сопровождается в основном снижением метанового ее числа и возрастанием задержки воспламенения смеси с 2 до 3,7 мс.

По мере увеличения добавки КППГ ЦЧ смеси уменьшается. Увеличение добавки КППГ в диапазоне 0 – 80% сопровождается увеличением задержки самовоспламенения с 2,2 до 3,6 мс.

Надежная работа ГД на топливной смеси может быть обеспечена при содержании в ней 15–20 % ДТ. Изменение величины запальной дозы ($\Delta G_{зд}$) оказывает заметное влияние на выброс NO_x и C_mH_n .

Перевод дизеля с системой «Common rail» на ГД не представляет особых сложностей. В электрическую цепь «ЭБУ–датчик давления» подключают ЭБУ «Blue-Power Diesel» СУГ/КПГ.

Применение газодизельной аппаратуры обеспечивает замещение ДТ газовым топливом от 70 до 85 %. При этом установлено значительное снижение токсичности ОГ: по твердым частицам - в 2 раза; CO - в 3 раза; CO₂ - в 1,2 раза; NO_x - в 1,14 раза и SO_x - в 5,0 раз.

Положительный опыт получен при эксплуатации двухтопливной ГД «BRAVO» (Турция) при работе на СУГ и КПГ современных тракторов.

Применение разработанной ГД обеспечивает замещение ДТ на 75 – 80 %, улучшение топливной экономичности ГД на 10 – 15 % на режимах малых и средних нагрузок, обеспечивает снижение уровня дымности и токсичности ОГ, а также уровень шума автомобиля.

с однотопливными системами питания для работы на сжатом природном газе. Высокая степень сжатия ($\varepsilon = 12$) ТС позволяет реализовать потенциальные свойства газового топлива.

Разработанная мочевины для восстановления NO_x без цвета, запаха, получившая название «AdBlue», содержит 32,5% мочевины (растворенные белые кристаллы) и 65,5 % воды. Разложение карбамида происходит при температуре 133 °С

При оценке интегральной токсичности ОГ двигателя на режимах 13-ти ступенчатого цикла на каждом режиме определяют концентрации C_{NO_x} и рассчитывают их часовые массовые выбросы E_{NO_x} . Удельные выбросы NO_x определяют путем суммирования полученных значений NO_x за весь цикл по каждому компоненту и затем делению на условную среднюю мощность дизеля за каждый испытательный цикл $\Sigma(N_{ei}, K_i)$:

$$g_{NO_x} = \frac{\sum_{i=1}^{13} M_{NO_x} k_i}{\sum_{i=1}^{13} N_{ei} k_i}, \text{ г/(кВт.ч)} \quad (13)$$

где $M_{(NO_x)}$ – массовый выброс вредного вещества (г/ч) на i – м режиме; N_{ei} – мощность, развиваемая двигателем на i – м режиме, кВт; k_i – коэффициент весомости i – го режима.

Массовый выброс NO_x на режимах 13-ти режимного цикла, поступающих в выпускную систему, может быть представлен зависимостью:

$$M_{NO_x} = N_{ец} g_{NO_x}, \text{ г/ч} \quad (14)$$

M_{NO_x} – масса выброса ВВ на режимах 13-ти ступенчатого цикла, кг/ч; $N_{ец}$ – мощность, развиваемая двигателем в испытательном цикле, кВт; g_{NO_x} – удельный выброс оксидов азота в испытательном цикле, отнесенные к единице вырабатываемой мощности, г/(кВт.ч).

Согласно химическим реакциям для расщепления 1 г NO_x необходимо 3,0 г мочевины. Используя пропорцию, получим необходимое количество мочевины для расщепления NO_x.

Определение количества мочевины для реакции с NO_x при сжигании 1 кг топлива:

$$M_m = g_m M_{NO_x}, \text{ г/ч} \quad (15)$$

M_m – масса мочевины, кг/ч; g_m – удельная масса мочевины необходимая для реакции расщепления

1 г NO_x необходимо 3 г мочевины.

Объем воздуха необходимый для распыливания мочевины представлен зависимостью:

$$M_B = M_m l_{ам} \quad (16)$$

$l_{ам}$ – стехиометрический коэффициент аммиака равен $6,1$ кг воздуха/кг аммиака.

Объем емкости для мочевины может быть представлен зависимостью:

$$V_{бм} = V_{дт} M_m \quad (17)$$

где $V_{бм}$ – объем бака мочевины; $V_{дт}$ – объем бака ДТ; M_m – масса мочевины.

Средний расход аммиачной жидкости составляет 6% от потребляемого ДТ. Запас мочевины обеспечивает пробег $5\,000$ км магистрального автопоезда. Стоимость жидкости «AdBlue» в 4 раза выше базового топлива.

Применение селективного каталитического нейтрализатора SCR обеспечивает снижение выбросы сажи до 98% . Система «AdBlue» SCR «DeNO_x» обеспечивает снижение NO_x до уровня 95% .

Проведен анализ комплексной системы «AdBlue» SCR «DeNO_x» снижения нейтрализации сажи в каталитическом нейтрализаторе и снижение выбросов оксидов азота путем подачи мочевины. Применение мочевины в системе нейтрализации ОГ дизеля снижает на $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ температуру начала химических реакций.

Комплексная система «AdBlue» SCR «DeNO_x» обеспечивает выполнение требований экологической эффективности дизелей уровня EBPO 5.

Список использованных источников

1. Токсичность современных автомобилей. / Ерохов В.И. //Методы и средства снижения вредных выбросов в атмосферу. Учебное издание. Изд-во «ФОРУМ»,- 2017. –458 с.
2. Service Training VSQ-ngVSQ- 1.Bi Fuel.427. «VOLKSWAGEN roup Academy» http://jettalub.org/uploads/SSP_rus_427_reysteija.Pdf 2009. –59 С.
3. ГОСТ Р ИСО 22241-1. –2012. Двигатели дизельные. Восстановитель оксидов азота AUS 32. Часть 1. Требования к качеству. Москва. –2013. –8 С.