

УДК 629.113

С.І. Кривошапов*Харківський національний автомобільно-дорожній університет***НОРМУВАННЯ ВИТРАТ РІДИНИ ДЛЯ НЕЙТРАЛІЗАЦІЇ ВИКИДІВ ОКСИДІВ АЗОТУ У ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ АВТОМОБІЛЯ (РОЗЧИНУ СЕЧОВИНИ)**

Встановлено, що у законодавстві України не передбачено нормування рідини для нейтралізації оксидів азоту, що містяться у відпрацьованих газах автомобілів. Показано, що споживання розчину сечовини залежить від витрати палива, навантажувальних і швидкісних режимів роботи автомобіля. Запропоновано математичну модель розрахунку нормативної кількості розчину сечовини при експлуатації автотранспортних засобів. Наведено розрахунки витрати рідини AdBlue на прикладі автомобіля MAZ-5550.

Ключові слова: токсичність, викиди шкідливих речовин, автотранспортний засіб, нормування, нейтралізація відпрацьованих газів, витрата палива, рідина AdBlue.

С.И. Кривошапов**НОРМИРОВАНИЕ РАСХОДА ЖИДКОСТИ ДЛЯ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ВЫБРОСОВ ОКСИДОВ АЗОТА В ОТРАБОТАВШИХ ГАЗАХ АВТОМОБИЛЯ (РАСТВОРА МОЧЕВИНЫ)**

Установлено, что в законодательстве Украины не предусмотрено нормирования жидкости для нейтрализации оксидов азота, содержащихся в отработавших газах автомобилей. Показано, что потребление раствора мочевины зависит от расхода топлива, нагрузочных и скоростных режимов работы автомобиля. Предложена математическая модель расчета нормативного количества раствора мочевины при эксплуатации автотранспортных средств. Приведены расчеты расхода жидкости AdBlue на примере автомобиля MAZ-5550.

Ключевые слова: токсичность, выбросы вредных веществ, автотранспортное средство, нормирование, нейтрализация отработавших газов, расход топлива, жидкость AdBlue.

S. Krivoshapov**RATIONING CONSUMPTION OF LIQUID TO NEUTRALIZE NITROGEN OXIDES IN THE EXHAUST GASES OF VEHICLES (SOLUTION OF UREA)**

It is established that the legislation of Ukraine does not provide for the standardization of liquids to neutralize the nitrogen oxides contained in the exhaust gases of cars. It is shown that consumption of urea solution depends on fuel consumption, load and speed modes of the car. A mathematical model is proposed for calculating the normative amount of a urea solution during the operation of vehicles. Calculations of fluid flow AdBlue on the example of the car MAZ-5550 are given.

Keywords: toxicity, emissions of harmful substances, motor vehicle, rationing, neutralization of exhaust gas, fuel consumption, AdBlue fluid.

Постановка проблеми. Екологічна обстановка на Україні досить складна. Сильно забруднена атмосфера Донецької, Луганської, Дніпровської, Запорізької областей. Небезпечними для людей є міста: Дніпро, Кам'янське, Одеса, Слов'янськ, Краматорськ, Херсон, Лисичанськ, Миколаїв, Луцьк, Кривий Ріг, Маріуполь, Київ. У центральній частині України виявлено значне забруднення оксиду азоту, яке у місті Дніпро перевищує нормативи у троє. Основним джерелом забруднення є промисловість або автомобільний транспорт. У Києві біля 80 % забруднення припадає на автотранспортні засоби.

У процесі згоряння паливної суміші в двигуні автомобіля утворюється шкідливі речовини, які становлять небезпеку для навколишнього середовища особливо для людини. Для нейтралізації шкідливих компонентів застосовуються різні способи. Система SCR - (Селективна Каталітична Нейтралізація) - полягає в розкладанні шкідливих оксидів азоту на нешкідливі речовини - азот і воду. Для цього у вихлопну систему автомобіля вприскується речовина на основі аміаку. Як правило, це водний розчин сечовини, що має торгове маркування - AdBlue. Реагент дозволяє зменшити кількість оксидів азоту у вихлопі дизельних двигунів до 90 %.

На автомобілі реагент зберігається у спеціальному баку, а в процесі експлуатації розчин сечовини поступово витрачається. Нажаль у законодавчій бази України відсутні нормативні значення витрати AdBlue під час руху автомобіля [1]. Виробники вважають, що витрата AdBlue становитиме 4...5 % від витрати палива у разі відповідності стандарту Євро-4 і 6 % у разі Євро-5 [2]. У нормативах [3] встановлені норми витрати рідини AdBlue для декількох транспортних засобів, переважно для вантажних автомобілів, але на Україні ці нормативи не мають юридичної сили.

Бажано розробити алгоритм визначення необхідної кількості речовини, яка містить аміак, для відновлення викидів оксиду азоту, що знаходяться у відпрацьованих газах автотранспортних засобів. Тому **метою роботи** є побудова такої математичної моделі, яка на основі технічних параметрів автомобілів з урахуванням умов їх експлуатації дозволить аналітично визначати потрібну кількість рідини AdBlue у л/100 км.

Результати досліджень. Для наближеної оцінки потрібної кількості рідини AdBlue, а також для оцінки факторів, які впливають на її витрату, можна скористатись регресійним аналізом. У нормативі [3] наведені значення витрати палива та рідини AdBlue для деяких автомобілів. На рис. 1 наведено аналіз витрати палива і рідини по цим маркам автомобілів та отримані поліноміальні коефіцієнти A і B , які входять у залежність виду:

$$H_{\text{AdBlue}} = A \cdot Q + B, \quad (1)$$

де Q - витрата палива у л/100 км; A і B - емпіричні коефіцієнти.

Значення коефіцієнтів $A=0,1373$ і $B=-3,2461$. Коефіцієнт кореляції розрахунків склало 0,38.

У нормативах [3] наведено лише 22 марки вантажних автомобілів з різних класів екологічної безпеки: 5, 5/EEV і 6. Швидкість транспортних засобів варіюється від 77.9 до 87.7 км/год. В той час як середня технічна швидкість для середніх умов експлуатації вантажних автомобілів складає 48 ... 65 км/год (1 категорії доріг) [7].

Можливо перенести отриману закономірність для інших марок автомобілів, які не вказані у [3], але достовірність отриманих результатів буде малою.

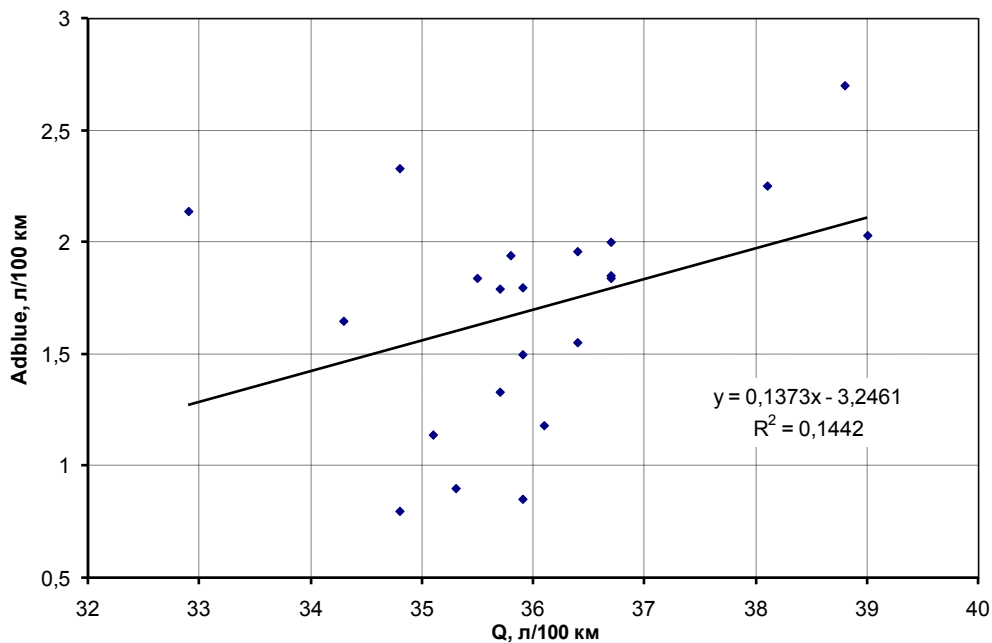


Рис. 1. Залежність витрати рідині AdBlue від витрати палива, що побудовано за даними [3]

Розглянемо які процеси відбуваються під час нейтралізації відпрацьованих газів у системі SCR. Умовно процес складає з трьох стадій: термолізу, гідролізу та каталітичної нейтралізації. Хімічні процеси протікають наступним чином:

Термоліз: $(\text{NH}_2)_2\text{CO} \rightarrow \text{NH}_3 + \text{HNCO}$;

Гідроліз: $\text{HNCO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NH}_3 + \text{CO}_2$;

Каталітична нейтралізація при температурі понад 250 °C: $4\text{NO} + 4\text{NH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$;

Каталітична нейтралізація при температурі 170...300 °C:
 $\text{NO} + \text{NO}_2 + 2\text{NH}_3 \rightarrow 2\text{N}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$.

Для нейтралізації викидів NOx (NO, NO₂) приблизно потрібно застосувати 1/2 сечовини (за масою). Молекулярна маса оксиду азоту (NO) складає 30 г/моль. Молекулярна маса сечовини ((NH₂)₂CO) складає 60 г/моль. З урахуванням відносин молекулярних мас оксиду азоту та сечовини, для нейтралізації 1 кг NO потрібно застосувати 1 кг сечовини.

AdBlue - є водний розчин, що складається з 32,5 % високоочищеної сечовини і 67,5 % демінералізованої води (за вагою). Щільність сечовини складає 1,32 г/см³. Щільність рідини AdBlue при температурі 20 °C - 1,087...1,093 г/см³.

Тоді на нейтралізацію 1 кг NO потрібно застосувати 2,82 л речовини AdBlue.

Для визначення кількості викидів шкідливих речовин NO_x можливо скористатися формулою [6]:

$$Q'_{NO} = 0.0548 \cdot M_x \cdot \rho_T \cdot (A_2 + B_2 \cdot N_1 + C_2 \cdot N_1^2) \cdot Q \cdot \alpha \quad \text{г/км}, \quad (2)$$

де M_x - молекулярна маса шкідливої речовини, г/моль; ρ_T - щільність палива, г/см³; A_2, B_2, C_2 - постійні коефіцієнти, що залежать від типу встановленого на автомобілі двигуна й виду шкідливої речовини; N_1 - відсоток використання потужності, %; Q - витрати палива, л/100 км.

Витрату палива Q порівнюємо до базової норми витрати палива H_S , яка наведена для різних марок та моделей автомобілів у нормативі [1], або розрахувати за методиками [5, 7].

Для викидів оксидів азоту NO_x приймаємо наступні значення молекулярної маси M_x і коефіцієнтів A_2, B_2, C_2 : $M_x = 30$ г/моль, $A_2 = 0.02$, $B_2 = 2.3 \cdot 10^{-3}$, $C_2 = -4 \cdot 10^{-6}$.

Коефіцієнт надлишку повітря визначається за наступною спрощеною формулою:

$$\alpha = a_1 + b_1 \cdot N_1, \quad (3)$$

де a_1 і b_1 - емпіричні коефіцієнти, що залежать від типу встановленого на автомобіль двигуна. Для автомобілів з дизельним двигуном: $a_1 = 5$, $b_1 = -0.035$.

Тоді

$$\alpha = 5 - 0.035 \cdot N_1. \quad (4)$$

Процент використання потужності може розрахувати так

$$N_1 = \frac{100 \cdot (G_a \cdot \psi \cdot V_a + 0.077 \cdot kF \cdot V_a^3)}{3.6 \cdot 10^3 \cdot N_{e_{\max}} \cdot \eta_{\text{тр}}} \quad \%, \quad (5)$$

де $N_{e_{\max}}$ - максимальна потужність двигуна автомобіля, кВт; G_a - вага автомобіля, Н; $\eta_{\text{тр}}$ - ККД трансмісії; ψ - коефіцієнт сумарного дорожнього опору руху автомобіля; kF - фактор обтічності, Н·с²/м²; V_a - середня технічна швидкість руху автомобіля, км/год.

Проведемо розрахунки рідини на прикладі автомобіля MA3-5550. Для цього автомобіля приймаємо такі технічні дані [4, 8]: $G_a = 141877$ Н; $kF = 3.864$ Н·с²/м²; $V_a = 50$ км/год.; $\psi = 0.02$; $\eta_{\text{тр}} = 0.88$; $N_{e_{\max}} = 200.7$ кВт; $Q = 30$ л/100 км.

За формулою (5) визначаємо процент використання потужності

$$N_1 = \frac{100 \cdot (141877 \cdot 0.02 \cdot 50 + 0.077 \cdot 3.864 \cdot 50^3)}{3.6 \cdot 10^3 \cdot 200.7 \cdot 0.88} = 28.16 \quad \%.$$

За формулою (4) розраховуємо коефіцієнта надлишку повітря:

$$\alpha = 5 - 0.035 \cdot 28.16 = 4.014.$$

Згідно формули (2) на 100 км шляху у відпрацьованих газів автомобіля утворюються наступна кількість оксидів азоту NO_x:

$$Q' = 0.00548 \cdot 30 \cdot 0.825 \cdot (0.02 + 2.3 \cdot 10^{-3} \cdot 28.16 - 4 \cdot 10^{-6} \cdot 28.16^2) \cdot 30 \cdot 4.014 = 1.33 \quad \text{кг/100 км}.$$

Оскільки нейтралізація оксидів азоту не відбувається на холостому режимі роботи двигуна внутрішнього згорання, а також на режимах, коли відпрацьовані гази не досягли необхідну температуру, то зменшимо розрахунки на 50 %.

Визначаємо витрату речовини AdBlue за формулою

$$H_{\text{AdBlue}} = 1.411 \cdot Q'_{\text{NO}} = 1.411 \cdot 1.33 = 1.88 \text{ л/100 км.}$$

Запропоновано прийняти норму витрати речовини AdBlue - $H_{\text{AdBlue}} = 1.88 \text{ л/100 км.}$

Для автомобіля MA3-5550 за формулами (2), (4) і (5) отримуємо залежність витрати речовини AdBlue від витрати палива:

$$H_{\text{AdBlue}} = 0.0626 \cdot Q. \quad (6)$$

Згідно рекомендацій [2] для автомобілів, які відповідають нормам токсичності Євро-5, витрата речовини AdBlue становить 6 % від витрати палива. Тоді $H_{\text{AdBlue}} = 0.06 \cdot Q = 0.06 \cdot 30 = 1.8 \text{ л/100 км.}$ Похибка склала 4 %.

В межах швидкості автомобіля від 30 до 60 км/год. коливання кількості оксиду азоту у відпрацьованих газах (г/км) не перевищує 10 %.

Точність розрахунків можна підвищити шляхом моделювання роботи системи управління SCR в залежності від вмісту оксиду азоту в відпрацьованих газах і температури каталітичного нейтралізатора. Також підвищити точність розрахунків можливо шляхом створенням більш точної методики розрахунку вмісту шкідливих речовин у відпрацьованих газах автомобіля на різних режимах його руху.

Висновки. Необхідно вдосконалювати чинну методику нормування паливно-мастильних матеріалів на автомобільному транспорті шляхом впровадження нормативних значень рідини AdBlue для дизельних транспортних засобів.

Розрахунковим методом за наведеною математичної моделі можливо приблизно розрахувати споживання розчину сечовини з урахуванням нормування витрати палива, швидкості та потужності автомобіля. Наприклад, норма витрати рідини AdBlue для автомобіля MA3-5550 складає 1,88 л/100 км

1. Нормы расхода топлива и смазочных материалов на автомобильном транспорте. – Киев: Минтранс Украины, 1998. - 45 с.

2. Technologie // Blue Solution www.bluesolution.pl — Режим доступа: <http://www.bluesolution.pl/technologie>.

3. Распоряжение Минтранса России от 14.05.2014 N НА-50-р "О внесении изменений в Методические рекомендации "Нормы расхода топлив и смазочных материалов на автомобильном транспорте", введенные в действие распоряжением Министерства транспорта Российской Федерации от 14 марта 2008 г. N АМ-23-р" [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс – надежная правовая поддержка : Официальный сайт компании «КонсультантПлюс». — Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_163082/.

4. Об установлении норм расхода топлива в области транспортной деятельности и признании утратившими силу некоторых нормативных правовых актов Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь [электронный ресурс] : Постановление Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь, 6 января 2012 г. № 3 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь, 31.07.2012, 8/26157 — Режим доступа: <http://www.pravo.by/main.aspx?guid=3871&p0=W21226157&p1=1>.

5. Говорущенко Н.Я. Системотехника транспорта (на примере автомобильного транспорта) [текст] / Н.Я. Говорущенко, А.Н. Туренко. – Харьков: ХНАДУ, 1999. – 457 с.

6. Говорущенко Н.Я. Экономия топлива и снижение токсичности на автомобильном транспорте [текст] / Н.Я. Говорущенко. – М.: Транспорт, 1990. – 135 с., ил., табл.

7. Говорущенко Н.Я. Системотехника автомобильного транспорта (расчетные методы исследований) : монография / Н.Я. Говорущенко. - Харьков: ХНАДУ, 2011. - 297 с.

8. Краткий автомобильный справочник / А.Н. Позниозовкин, Ю.М. Власко, М.Б. Ляликов и др. – М.: АО «ТТАНСКОСАЛТИНГ», НИИАТ, 1994. – 779 с.

Рецензент:

Полянський А.С., доктор технічних наук, професор, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, професор кафедри «Технології машинобудування і ремонту машин», Харків, Україна.