

УДК 629.113

В.П.Сахно, О.А.Корпач

Національний транспортний університет

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТОКСИЧНОСТІ АВТОМОБІЛЯ З ДВИГУНАМИ РІЗНОЇ ПОТУЖНОСТІ ПРИ ВИКОНАННІ МІСЬКОГО ЇЗДОВОГО ЦИКЛУ

У статті запропонована математична модель для визначення токсичності автомобіля з двигунами різної потужності при виконанні міського їздового циклу. На прикладі автомобіля VW Golf V з бензиновими двигунами різної потужності без використання каталітичних нейтралізаторів при виконанні міського їздового циклу збільшення потужності двигуна призводить до зростання кількості шкідливих речовин. Так, при збільшенні потужності на 12,0 % (з 66 до 75 кВт), сумарна токсичність, приведена до CO, автомобіля збільшується на 9,4% (з 2051,94 г/цикл до 2244,9 г/цикл).

Вступ. Головною причиною екологічної ситуації, що погіршується з кожним роком як у світі, так і в нашій країні, особливо в містах, стало неухильне зростання чисельності автомобільного парку. В масштабах країни доля автотранспорту в сумарних викидах забруднюючих речовин в атмосферу всіма техногенними джерелами сягає в середньому 40%, у викидах парникових газів - наближено 10%, в масі промислових відходів - 2%, в скиданнях шкідливих речовин із стічними водами - близько 3%, у вжитку озоноруйнуючих речовин - близько 5% [1].

Аналіз літературних джерел. Кількість шкідливих викидів залежить від багатьох факторів, основними з яких (стосовно окремого двигуна) є режими його роботи та регульовальні параметри. Якщо ж говорити про оцінку автомобіля, з огляду токсичності, то тут ще додаються фактори зумовлені умовами експлуатації. Визначальними у забрудненні, що чинить на довкілля транспорт в цілому є і фактори пов'язані з управлінням.

Шкідливі речовини, що надходять у атмосферу з відпрацьованими газами (ВГ) двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) утворюються при згорянні вуглеводневих палив безпосередньо в циліндрах.

Відпрацьовані гази ДВЗ складаються, переважно, з нешкідливих продуктів згоряння палива - діоксиду вуглецю CO_2 , пара води H_2O і атмосферного азоту N_2 . У відносно невеликій кількості у ВГ містяться різноманітні шкідливі речовини, які можна умовно поділити на окремі групи.

До першої групи відносять речовини, що утворюються при згорянні палива в циліндрах двигуна - це продукти неповного або часткового окиснення палива, продукти розкладу палива, пара палива, що приймало участь у згорянні та продукти піролізу палива. Зазвичай, їх поєднують в одну групу, яку умовно називають продуктами неповного згоряння. До неї відносять: оксид вуглецю CO, вуглеводні CH, альдегіди RCHO, сажа C, канцерогенні речовини $C_{20}H_{12}$ - бенз(б)пірен та ін. [2]

До другої групи відносять токсичні речовини, які утворюються в циліндрах двигуна при взаємодії атмосферного азоту з киснем - це оксиди азоту NO_x .

До третьої групи шкідливих речовин відносять токсичні речовини, які утворюються в результаті взаємодії домішок, що містяться в паливі, з киснем. Вміст домішок у паливі нормують відповідними стандартами стосовно палив. До цієї групи шкідливих речовин відносять діоксид сірки SO_2 та сполуки свинцю.

Основні фактори, які впливають на утворення першої групи шкідливих речовин - продуктів неповного згоряння палива:

- якість розпилювання та випаровуваність палива, що зумовлюють однорідність горючої суміші;
- турбулізація заряду в камері згоряння, яка впливає на інтенсифікацію процесу згоряння;
- момент запалювання (який визначає кут випередження запалювання) та потужність електричної іскри для бензинових двигунів;
- момент впорскування (який визначає кут випередження впорскування) для дизелів;
- рівномірність розподілу палива по циліндрах двигуна;
- ступінь підігрівання заряду;
- конструкція і розміри камери згоряння;

- температура стінок камери згоряння;
- склад горючої суміші;
- спосіб сумішоутворення;
- фракційний склад палива.

Утворення шкідливих речовин, які відносять до другої групи впливають такі фактори:

- температура робочого тіла в циліндрах двигуна в процесі згоряння палива;
- ступінь стискання;
- склад горючої суміші;
- спосіб сумішоутворення;
- конструкція і форма камери згоряння;
- інтенсивність турбулентності свіжого заряду;
- фракційний склад моторного палива.

На утворення шкідливих речовин першої і другої групи, практично, впливають однакові фактори. Проте, якщо утворення продуктів неповного згоряння зумовлює недовершеність процесу згоряння, то утворення оксидів азоту пов'язане з їх досконалістю. Треба наголосити, що переважаючими є фактори, пов'язані з функціонуванням систем живлення і запалювання, які можна регулювати в умовах експлуатації.

На утворення шкідливих речовин, що відносять до третьої групи впливають:

- мікроелементний склад нафти;
- Встановлено, що мікроелементний склад нафти коливається в широких межах. Всього в нафті визначено більше 60 різноманітних елементів.
- технологія переробки нафти;

Чим більш глибока переробка нафти, тим більший вміст мікроелементів буде в моторних паливах, тобто мікроелементний склад практично повністю сконцентрований в смолисто-асфальтній її частині.

В сучасних умовах, згідно з нормативними документами, у ВГ автомобілів з бензиновими двигунами обмежуються викиди оксиду вуглецю CO, вуглеводнів CH та оксидів азоту NO_x.

Одним із найпоширеніших методів визначення токсичності відпрацьованих газів (ВГ) є вимірювання концентрації в них шкідливих речовин. Концентрації шкідливих речовин у ВГ змінюються в широких межах і залежать від типу двигуна, режимів їх роботи, складу папиво-повітряної суміші тощо.

Великі концентрації шкідливих речовин прийнято оцінювати об'ємними процентами (%), а малі - в частинках на мільйон (млн.⁻¹). Залежно від методу вимірювання і застосовуваного обладнання концентрації шкідливих речовин вимірюють у сухих, вологих і розбавлених ВГ. У сухих продуктах згорання вимірюють концентрації оксиду вуглецю (CO), вуглеводнів (CH) методом інфрачервоної спектроскопії.

Якщо концентрації вуглеводнів вимірюють приладами, в яких застосовано полум'яно-іонізаційний метод, а оксидів азоту (NO_x) - метод хімічної люмінесценції, то в пробовідбірнику забезпечено обов'язкове підігрівання ВГ у межах 150-200 °С. У такому разі концентрації вимірюють у вологих відпрацьованих газах, без конденсації водяної пари. [2]

Проте концентрації шкідливих речовин у ВГ не можуть повністю характеризувати токсичність двигуна чи транспортного засобу в цілому, тому що кількість шкідливих речовин, що надходить в атмосферу, залежить не тільки від концентрації шкідливої речовини, а і від кількості продуктів згорання палива, тобто кількості ВГ.

Кількість шкідливих речовин, які надходять з ВГ у атмосферне повітря визначають їх масою. Залежно від того, в яких одиницях (% , млн.⁻¹, г/м³) та в яких ВГ (сухих, вологих чи розбавлених) виміряно концентрацію і-ї забруднюючої речовини, їх масові викиди розраховують з використанням різних методик.

Метою роботи є уточнення математичної моделі для визначення кількості шкідливих викидів автомобіля з двигунами різної потужності при виконанні міського їздового циклу.

Результати досліджень. Для порівняльної оцінки токсичності відпрацьованих газів автомобілів з двигунами різної потужності можна провести розрахункове дослідження. Методику як розрахунків, так і випробувань зручно розглянути на основі виконання автомобілем міського їздового циклу згідно з положеннями за ГОСТ 20306-90.

Дорожні ділянки для вимірювань витрати палива в міському циклі мають бути прямолінійними, горизонтальними, із цемент- або асфальтобетонним гладким, сухим і чистим покриттям.

Швидкісні режими руху нормуються оперативною картою та графічною схемою усього циклу для кожного типу автомобіля. У світовій практиці розроблено багато схем магістрального і міського циклів, проте вони наділені чималою кількістю спільних рис, що дозволяє порівнювати одержані результати випробувань автомобіля. Характерним є включення до циклу типових фаз руху: розгін; усталена швидкість; сповільнення за допомогою двигуна або гальмівної системи; повна зупинка. Послідовне виконання названих фаз (операцій) встановлено через певні відстані шляху, рис. 1.[3]

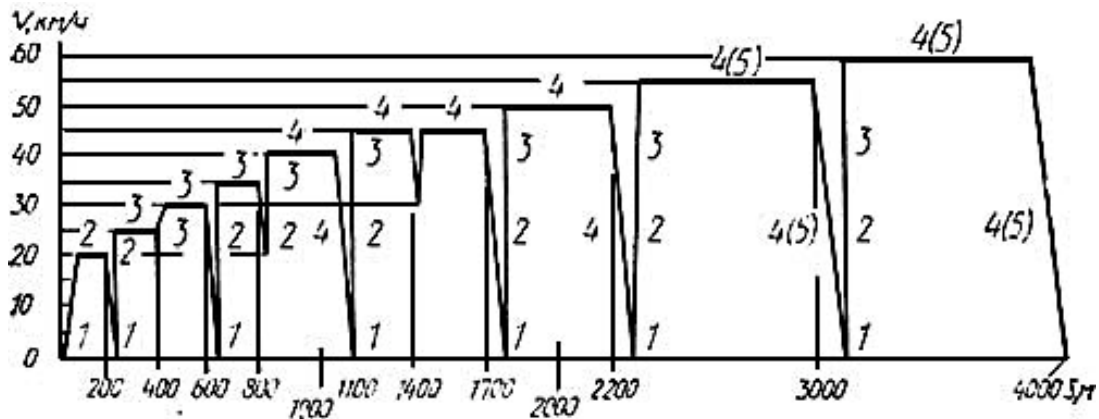


Рис. 1. Схема міського їздового циклу для АТЗ повною масою менше 3,5 т:

В більшості випадків кількість ВГ розраховують за витратою повітря і палива, що приймали участь у згоранні, або вимірюють спеціальними витратомірами. Масу забруднюючих речовин визначають за залежностями: [2]

$$G_i = \frac{C_i''}{100} \cdot \mu_i \cdot M_{ВГ}, \text{ кг}; \quad G_i = \frac{C_i'}{10^6} \cdot \mu_i \cdot M_{ВГ}, \text{ кг} \quad (1)$$

C_i'' та C_i' – концентрації і-ї шкідливої речовини, відповідно у % чи млн.⁻¹;

μ_i – молекулярна маса і-ї шкідливої речовини, кг/кмоль;

$M_{ВГ}$ – кількість продуктів згорання палива, кмоль;

Концентрації і-х шкідливих речовин C_i'' та C_i' визначають експериментально при стендових випробуваннях. За відсутності даних випробувань з певною часткою достовірності можна використовувати відомості щодо концентрацій отриманих з ідеальних характеристик двигуна, рис 2. [4]

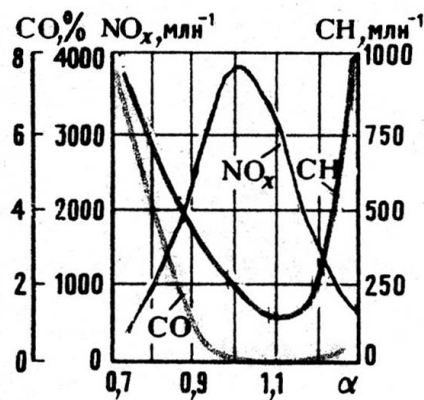


Рис. 2 Залежність концентрації токсичних речовин в відпрацьованих газах чотирьохтактного бензинового двигуна [4]

Сучасні бензинові двигуни працюють на паливо-повітряній суміші, близькій до стехіометричної ($\alpha = 1$). Тоді згідно з рис. 2 приймаємо: концентрацію оксиду вуглецю $C_{CO} = 0,2\%$, вуглеводнів $C_{CH} = 150 \text{ млн}^{-1}$, оксидів азоту $C_{NOx} = 3800 \text{ млн}^{-1}$.

Витрата сухих M_{BG}^C і вологих M_{BG}^B продуктів згоряння під час випробувань також можна вимірювати спеціальними витратомірами, але частіше їх розраховують за вимірними витратами повітря і палива за рівнянням теорії двигунів: [2]

$$M_{BG} = a \cdot (b \cdot G_n + G_{нов}), \text{ кмоль} \quad (2)$$

де, $G_{нов}$ – витрата повітря на окремій ділянці маршруту, кг;

G_n – витрата палива на окремій ділянці маршруту, кг;

a і b – розрахункові коефіцієнти (табл. 1).

Таблиця. 1

Значення розрахункових коефіцієнтів a і b

Вид палива	Для сухих продуктів згоряння				Для вологих продуктів згоряння			
	$\alpha \leq 1$		$\alpha > 1$		$\alpha \leq 1$		$\alpha > 1$	
	a	b	a	b	a	b	a	b
Бензин	0,02259	6,104	0,03425	-1,0696	0,027	5,31	0,03425	1,058
Дизельне паливо	-	-	0,03425	-0,918	-	-	0,03425	0,924
Стиснутий природний газ	0,02137	7,0785	0,034215	-1,9567	0,02703	6,9367	0,03421	1,8269
Пропан автомобільний	0,02244	6,2746	0,03423	-1,3278	0,02704	5,882	0,03423	1,3272
Етиловий спирт	0,02193	4 090	0,034216	-0,6313	0,02703	4,0141	0,03422	1,268
Метанол	0,02163	3.0684	0,03420	-0,4555	0,02702	3.4696	0,03420	1,3719

Зважаючи на те, що в різних режимах роботи в циліндри бензинових двигунів подають паливоповітряну суміш різного складу (в режимах холостого ходу і дуже малих навантажень, а також за повного навантаження - збагачена, а в режимах середніх навантажень - збіднена) коефіцієнти a і b встановлені для випадків розрахунку кількості сухих і вологих продуктів згоряння за умови згоряння бідних і багатих сумішей та для різних видів палив.

Приймаємо значення коефіцієнтів a і b , що відповідає паливо повітряній суміші стехіометричного складу ($\alpha = 1$).

Витрата палива на окремій ділянці маршруту G_n визначається експериментально або за методикою наведеною в [5].

Витрата повітря на окремій ділянці маршруту $G_{нов}$ визначається, як:

$$G_{нов} = G_n \cdot L_0 \cdot \alpha, \text{ кг} \quad (3)$$

де L_0 – теоретично необхідна кількість повітря для згоряння 1 кг палива (для бензину $L_0 = 14,8$ кг/кг);

За залежностями (1), використовуючи (2) і (3), розраховують масові викиди оксиду вуглецю CO, вуглеводнів CH та оксидів азоту NO_x на окремих ділянках маршруту згідно з міським їздовим циклом, враховуючи, що масові викиди CO рахують за умови визначеної концентрації шкідливих речовин в об'ємних процентах (%) для сухих продуктів згоряння, CH – в об'ємних частинах на мільйон (млн.⁻¹) для сухих продуктів згоряння та NO_x - в об'ємних частинах на мільйон (млн.⁻¹) для вологих продуктів згоряння.

Знаючи масові викиди шкідливих речовин на окремих ділянках циклу, обчислюють сумарні викиди за цикл, кг/цикл:

$$G_{CO} = \sum G_{COi}, \text{ кг/цикл};$$

$$G_{CH} = \sum G_{CHI}, \text{ кг/цикл};$$

$$G_{NOx} = \sum G_{NOxi}, \text{ кг/цикл}$$

Міра впливу шкідливих речовин на організм людини залежить від їх концентрації, тривалості дії, індивідуальних особливостей людини і виду шкідливої речовини.

Кожній шкідливій речовині, за ступенем впливу на організм людини, властива певна агресивність чи небезпека. За одиницю відносної агресивності прийнято агресивність оксиду вуглецю CO. Значення коефіцієнтів відносної агресивності R_i для основних шкідливих речовин, що містяться у ВГ, наведено в табл. 2 [2]

Таблиця 2.

Значення коефіцієнтів відносної агресивності R_i основних шкідливих речовин, які містяться у ВГ автомобілів

Шкідлива речовина	R_i
Оксид вуглецю, CO	1
Сірчистий ангідрид, SO ₂	22,0
Оксиди азоту в перерахунку за масою на NO ₂	41,1
Леткі низькомолекулярні вуглеводні CH (пара рідких палив за вуглецем)	3,16
3,4 бенз(α)пірен	126000
Формальдегід	240
Акролеїн	294
Ацетальдегід	41,6
Сажа без домішок, C (пил вуглецю без урахування домішок)	41,5
Неорганічні сполуки свинцю (за Pb)	22400
Тверді частинки, що викидаються бензиновими двигунами, що живляться нестилованим бензином	300
Тверді частинки, що викидаються бензиновими двигунами, що живляться етилованим бензином	500
Тверді частинки, що викидаються дизелями і установками, які спалюють мазут і газ	200

За масовими викидами окремих шкідливих речовин з урахуванням коефіцієнта відносної агресивності розраховують сумарні масові викиди, зведені до CO, тобто сумарну токсичність джерела забруднення, в умовних тоннах за певний період часу:

$$G_{\Sigma CO} = \sum R_i \cdot G_i, \text{ кг/цикл}$$

За визначеними сумарними масовими викидами шкідливих речовин, зведеними до CO, порівнюють автомобілі з двигунами різної потужності.

У табл. 3 наведені результати розрахунку шкідливих викидів автомобілем VW Golf V з різними силовими агрегатами без використання каталітичних нейтралізаторів при виконанні міського їздового циклу.

Таблиця 3

Результати розрахунку шкідливих викидів при виконанні автомобілем VW Golf V міського їздового циклу

Модифікація	1.4 MPI	1.4 FSI	1.6 MPI	1.6 FSI	2.0 FSI	
Тип двигуна	Бензиновий (MPI)	Бензиновий (FSI)	Бензиновий (MPI)	Бензиновий (FSI)	Бензиновий (FSI)	
Об'єм, см ³	1390	1390	1595	1598	1984	
Потужність двигуна, к.с./кВт при хв ⁻¹	75/ 55/ 5000	90/ 66/ 5200	102/ 75/ 5600	115/ 85/ 6000	150/ 110/ 6000	
Крутний момент, Н·м при хв ⁻¹	126/ 3800	130/ 3750	148/ 3800	155/ 4500	200/ 3500	
Передаточні числа коробки передач						
Передаточне число	1-а	3.77	3.46	3.46	3.46	3.78
	2-а	2.1	1.96	1.96	1.96	2.27

	3-я	1.39	1.28	1.28	1.28	1.52
	4-а	1.03	0.98	0.98	0.98	1.19
	5-а	0.81	0.78	0.81	0.81	0.97
	6-а	-	-	-	0.71	0.82
	Задній хід	3.18	3.18	3.18	3.18	3.6
	Головна передача	4.53	4.53	4.53	4.53	3.65
Кількість шкідливих речовин у відпрацьованих газах при виконанні автомобілем міського їздового циклу (без каталітичного нейтралізатора)						
	CO, г	14,845	15,157	16,592	17,173	21,545
	CH, г	8,549	8,729	9,555	9,98	12,408
	NO _x , г	47,817	48,886	53,482	55,343	69,512
	Сумарна токсичність приведена до CO, г	2007,15	2051,938	2244,9	2323,029	2917,698

Висновки

Встановлено (табл. 3), що при використанні для розрахунку математичної моделі для визначення шкідливих викидів автомобіля на прикладі автомобіля VW Golf V з бензиновими двигунами різної потужності без використання каталітичних нейтралізаторів при виконанні міського їздового циклу збільшення потужності двигуна призводить до зростання кількості шкідливих речовин. Так, при збільшенні потужності на 12,0 % (з 66 до 75 кВт), сумарна токсичність приведена до CO автомобілем збільшується на 9,4% (з 2051,94 г/цикл до 2244,9 г/цикл).

1. В. Васильев, Диметилловый эфир. Надежды конструкторов, водителей и экологов// Основные средства, №1, 2007.
2. Гутаревич Ю.Ф., Зеркалов Д.В. та ін. Екологія та автомобільний транспорт: Навчальний посібник 2-ге вид., перероблене та доповнене. – К.: Арістей, 2008. – 296 с.
3. ГОСТ 20306-90 Автотранспортные средства. Топливная экономичность. Методы испытаний.- М.:Издательство стандартов,1991.-31 с.
4. Д.Н. Вырубов, Н.А. Иващенко, В.И. Ивин и др., под ред. А.С. Орлина, М.Г. Крутова. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей. -4-е изд., перераб. и доп. –М.:Машиностроение, 1983,- 373 с.
5. Фаробин Я.Е. Оценка эксплуатационных свойств автопоездов для международных перевозок /Я.Е.Фаробин, В.С. Шупляков. - М.: Транспорт, 1983. - 200 с.