

Stefan POSTRZEDNIK, Zbigniew ŻMUDKA

## CHARAKTERYSTYKA EMISJI SUBSTANCJI SZKODLIWYCH SILNIKÓW SPALINOWYCH

**Streszczenie.** Do oceny poziomu i jakości substancji szkodliwych emitowanych przez silniki spalinowe zdefiniowano względne wskaźniki emisji substancji toksycznych, zawartych w spalinach tych silników. Wskaźniki te uwzględniają parametry eksploatacyjne silników, przez co pełniej (niż same udziały molowe) ujmują istotę zagadnienia emisji substancji toksycznych. Dlatego też proponuje się stosowanie tych wskaźników do oceny pracy silników w aspekcie ekologicznym. Dla ilustracji przedstawiono ważniejsze wskaźniki emisji tlenu węgla, węglowodorów oraz tlenków azotu, wyznaczone dla całego pola pracy silnika wysokoprężnego SW400, a także dla silnika z zapłonem iskrowym 126A1.076/E.

Przytoczone rezultaty potwierdzają celowość stosowania i praktyczną przydatność zdefiniowanych wskaźników.

## CHARACTERISTIC OF TOXIC SUBSTANCES EMISSION INTERNAL COMBUSTION ENGINES

**Summary.** For the evaluation of the internal combustion engines with regard to the content of toxic substances in the exhaust gas, the relative emission indices of toxic substances are defined. A general application of these indices for engine evaluation on the basis of toxic substances emitted, is proposed. The defined relative indices depend on the operating factors, and by that explain the basis of the problem of toxic substances emission. For illustration, selected emission indices (for carbon monoxide CO, hydrocarbons HC and nitrogen oxides NO<sub>x</sub>) of Diesel engine SW400 and spark ignition engine 126A1.076/E, are given.

The mentioned results confirmed the purpose of application and the practical suitability of the defined indices.

## CHARAKTERISTIK DER SCHADSTOFFEMISSION VON VERBRENNUNGSMOTOREN

**Zusammenfassung.** Im Beitrag sind relative Kennwerte zur Charakterisierung der Schadstoffemission im Abgas vom Verbren-

nungsmotor definiert und zur Anwendung angebracht worden. Der an die Umgebung geleitete Massenstrom von Schadstoffen ist sowohl zum Massenstrom vom verbrauchten Brennstoff, als auch zur effektiven Motorleistung einbezogen worden. So definierte Kennziffer berücksichtigen die betrieblichen Parameter von Verbrennungsmotoren, wodurch die Tatsache der Schadstoffemission in größerem Umfang, als nur die molare Abgaszusammensetzung, eingefasst wird. Es wird vorgeschlagen, die in der Arbeit definierten charakteristischen Kennwerte zur (auf die Ökologie bezüglich) Beurteilung von Verbrennungsmotoren zu anwenden. Die ökologischen Kennwerte der Schadstoffemission wurden für die Kohlenmonoxid, Stickstoffoxide, und Kohlenwasserstoffe untersucht, für den Dieselmotor SW400 und einen Ottomotor 126A1.076 bestimmt, und im Beitrag dargestellt.

Die erlangten Ergebnisse bestätigen die praktische Brauchbarkeit der definierten Parameter und die Anwendungszweckmäßigkeit von denen.

## 1. WPROWADZENIE

Znajomość składu spalin silnika umożliwia m. in. badanie warunków spalania, analizę wzajemnych korelacji między substancjami zawartymi w spalinach, jak również wyznaczanie wielkości charakteryzujących procesy zachodzące w silniku, a których bezpośredni pomiar jest trudny lub niemożliwy. Skład spalin może być także wykorzystywany do celów diagnostycznych.

Szkodliwy wpływ pojazdów samochodowych na środowisko jest określane poprzez badania testowe [1]. Zakres dokonywanych pomiarów obejmuje określenie ilości substancji toksycznych emitowanych do otoczenia podczas testu. Wyniki badań zależą głównie od:

- charakterystyk toksyczności silnika spalinowego,
- procedury realizacyjnej testu,
- typu oraz sposobu przenoszenia mocy pojazdu.

Obiektem zainteresowania, przedstawionym w tym artykule jest pierwszy z przytoczonych powyżej warunków. Natomiast podstawowym celem realizowanych badań jest opracowanie ogólnego, matematycznego modelu, który umożliwiłby prognozowanie wielkości emisji substancji toksycznych, w zależności od warunków ruchu pojazdu [4], [6]. Wyznaczanie charakterystyki emisji substancji szkodliwych byłyby elementami bezpośrednio wykorzystywanymi w modelu.

## 2. WZGLĘDNE WSKAŹNIKI EMISJI SUBSTANCJI TOKSYCZNYCH

### 2.1. Podstawowe zależności definicyjne

Do oceny pracy silników spalinowych pod względem wielkości emisji substancji toksycznych w spalinach proponuje się wykorzystanie względnych wskaźników emisji [3], zdefiniowanych:

– względem strumienia  $\dot{m}_p$  zużywanego paliwa:

$$\varphi_{p,i} = \frac{\dot{n}_{tks,i}}{\dot{m}_p}, \quad [\varphi_{p,i}] = \frac{\text{kmol } i}{\text{kg pal.}} \quad (1)$$

lub

$$\bar{\varphi}_{p,i} = \frac{\dot{m}_{tks,i}}{\dot{m}_p}, \quad [\bar{\varphi}_{p,i}] = \frac{\text{kg } i}{\text{kg pal.}} \quad (2)$$

– w odniesieniu do osiągniętej mocy efektywnej  $N_e$  silnika:

$$\varphi_{e,i} = \frac{\dot{n}_{tks,i}}{N_e}, \quad [\varphi_{e,i}] = \frac{\text{kmol } i}{\text{kJ}} \quad (3)$$

lub

$$\bar{\varphi}_{e,i} = \frac{\dot{m}_{tks,i}}{N_e}, \quad [\bar{\varphi}_{e,i}] = \frac{\text{kmol } i}{\text{kJ}} \quad (4)$$

gdzie:

$\dot{n}_{tks,i}$ , kmol/s;  $\dot{m}_{tks,i}$ , kg/s – strumień materii  $i$ -tego składnika toksycznego (np.: CO, NO<sub>x</sub>, HC, SO<sub>y</sub>, sadza).

Wskaźnik  $\varphi_e$  posiada ograniczony zakres stosowności, gdyż jest mniej przydatny do oceny pracy silnika szczególnie na biegu jałowym i w obszarze niskich obciążeń, bowiem przy  $N_e \rightarrow 0$  przyjmuje zawsze wartości  $\varphi_e \rightarrow \infty$ , niezależnie od samego poziomu emisji substancji szkodliwych.

Wskaźnik  $\varphi_p$  może być wykorzystywany w całym obszarze pola pracy silnika. Wartość chwilowego strumienia  $\dot{m}_p$  zużywanego paliwa wynika z aktualnego zapotrzebowania mocy efektywnej  $N_e$  oraz osiągniętej sprawności efektywnej silnika  $\eta_e$ .

Korzystając z definicji sprawności efektywnej silnika

$$\eta_e = \frac{N_e}{\dot{m}_p W_d}, \quad (5)$$

gdzie:  $W_d$ , kJ/kg – wartość opałowa paliwa,  
można podać związek pomiędzy omawianymi wskaźnikami w formie:

$$\varphi_{e,i} = \frac{\varphi_{p,i}}{\eta_e W_d} \quad (6)$$

lub

$$\varphi_{e,i} = \frac{\dot{m}_p}{N_e} \varphi_{p,i} \quad (7)$$

Mając wyznaczone wskaźniki emisji dla poszczególnych substancji szkodliwych określić można następnie odpowiednie, ogólne wskaźniki toksyczności:

$$\Phi_p = \sum_{i=1}^k w_i \varphi_{p,i} \quad (8)$$

$$\Phi_e = \sum_{i=1}^k w_i \varphi_{e,i} \quad (9)$$

Wykorzystać należy w tym celu układ współczynników  $w_i$ , np. [8]:

Substancja toksyczna	$w_i$
benzopiren	6253,4
czteroetylenek ołowiu	625,3
dwutlenek siarki	1,0
sadza	8,1
tlenek azotu	2,9
tlenek węgla	0,5
węglowodory aromatyczne	1,5

wyrażających ekwiwalentność szkodliwości odpowiednich składników względem otoczenia, odniesioną do toksyczności dwutlenku siarki  $SO_2$ .

Innym sposobem lepszego charakteryzowania spalin pod względem emisji substancji toksycznych, odzwierciedlającym również doskonałość procesu spalania w silnikach, jest wyznaczanie oraz postępowanie się skorygowanym składem spalin [2].

## 2.2. Algorytm wyznaczania wskaźników emisji

Strumienie materii składników toksycznych wynoszą:

$$\dot{n}_{tks,i} = \dot{n}_{ss} [tks]_i \quad (10)$$

$$\dot{m}_{tks,i} = \dot{n}_{ss} [tks]_i M_i \quad (11)$$

gdzie:

$\dot{n}_{ss}$ , kmol/s – molowy strumień spalin suchych,  
 $[tks]_i$  – udział molowy  $i$ -tego składnika szkodliwego ([CO], [NO<sub>x</sub>],  
 [HC], [SO<sub>y</sub>], ...) w spalinach suchych,

$M_i$ , kg/kmol – masa cząsteczkowa  $i$ -tego składnika.

Ze wzorów (2) i (11) otrzymuje się:

$$\bar{\varphi}_{p,i} = \frac{\dot{n}_{ss}}{\dot{m}_p} [tks]_i M_i \quad (12)$$

Ponieważ:

$$\frac{\dot{n}_{ss}}{\dot{m}_p} = n_{ss}'' \quad [n_{ss}''] = \frac{\text{kmol}}{\text{kg pal.}} \quad (13)$$

oznacza jednostkową ilość spalin suchych, dlatego ostatecznie:

$$\bar{\varphi}_{p,i} = n_{ss}'' [tks]_i M_i \quad (14)$$

oraz

$$\bar{\varphi}_{e,i} = \frac{n_{ss}'' \dot{m}_p}{N_e} [tks]_i M_i \quad (15)$$

Jednostkową ilość spalin suchych  $n_{ss}''$  najdogodniej można wyznaczyć na podstawie równań bilansowych pierwiastków uczestniczących w procesie spalania. Wykorzystuje się w tym celu informacje o elementarnym składzie paliwa oraz mierzony skład spalin suchych [1], [5].

### 3. WYNIKI BADAŃ EMISJI SUBSTANCJI TOKSYCZNYCH

#### 3.1. Wskaźniki emisji dla silnika wysokoprężnego

Przeprowadzono badanie kształtowania się molowego udziału tlenu węgla CO, węglowodorów HC i tlenków azotu NO<sub>x</sub> w spalinach oraz względnych wskaźników emisji tych substancji, w całym obszarze pracy silnika wysokoprężnego SW400. Wyznaczono je z zależności:

– dla tlenu węgla:

$$\varphi_{p,CO} = n_{ss}'' [\text{CO}] \quad (16)$$

$$\varphi_{e,CO} = \frac{\dot{m}_p}{N_e} n_{ss}'' [\text{CO}] \quad (17)$$

– dla węglowodorów:

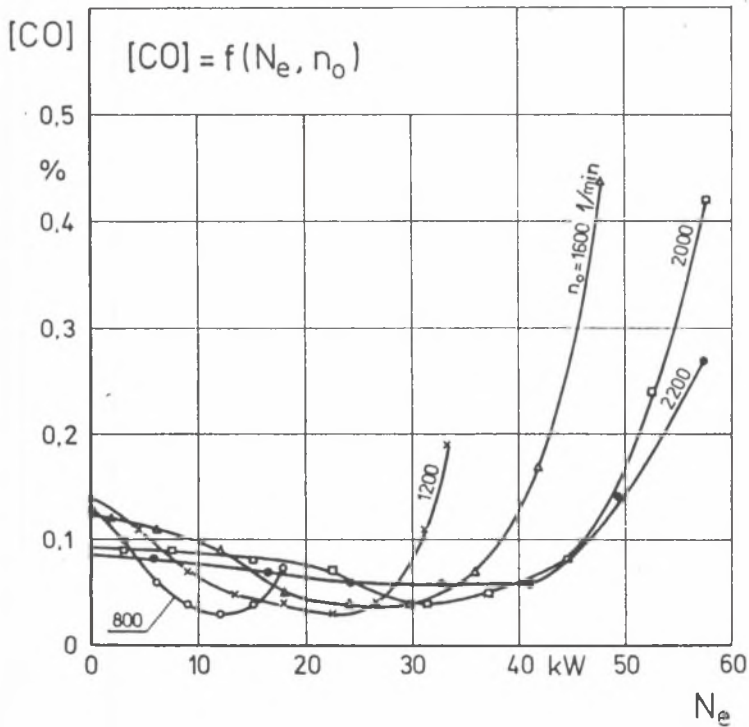
$$\varphi_{p,HC} = n_{ss}'' [\text{HC}] \quad (18)$$

$$\varphi_{e,HC} = \frac{\dot{m}_p}{N_e} n_{ss}'' [\text{HC}] \quad (19)$$

– dla tlenków azotu:

$$\varphi_{p,NO_x} = n_{ss}'' [\text{NO}_x] \quad (20)$$

$$\varphi_{e,NO_x} = \frac{\dot{m}_p}{N_e} n_{ss}'' [\text{NO}_x] \quad (21)$$



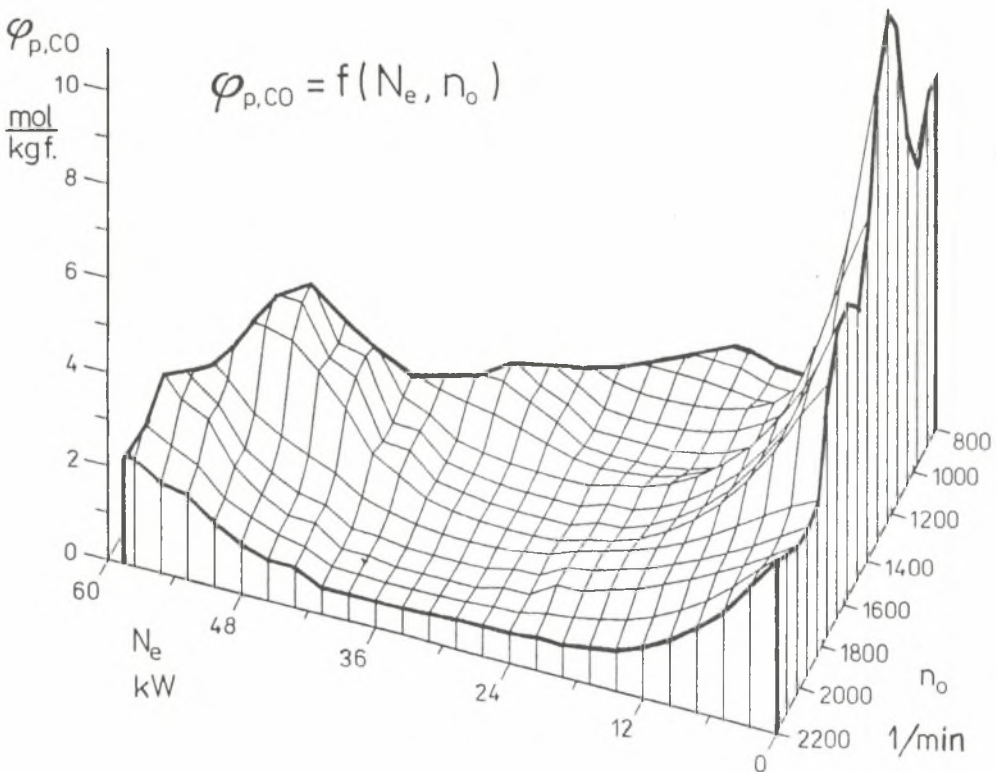
Rys. 1. Udział molowy tlenku węgla [CO] w spalinach silnika wysokoprężnego SW400

Fig. 1. Molar fraction of carbon monoxide [CO] in the exhaust gas of the Diesel engine SW400

Analiza pracy silnika pod względem emisji tlenku węgla, węglowodorów i tlenków azotu wykazuje, że branie pod uwagę tylko molowych udziałów [CO], [HC] i [NO<sub>x</sub>] w spalinach jest niewystarczające. Bardziej miarodajnymi wielkościami są omawiane wskaźniki względne.

Udział molowy tlenku węgla [CO] w spalinach (rys. 1) wykazuje szczególnie niekorzystne wartości przy dużych obciążeniach i wyższych prędkościach obrotowych, podczas gdy dla niskich obciążeń zawartość [CO] jest niższa.

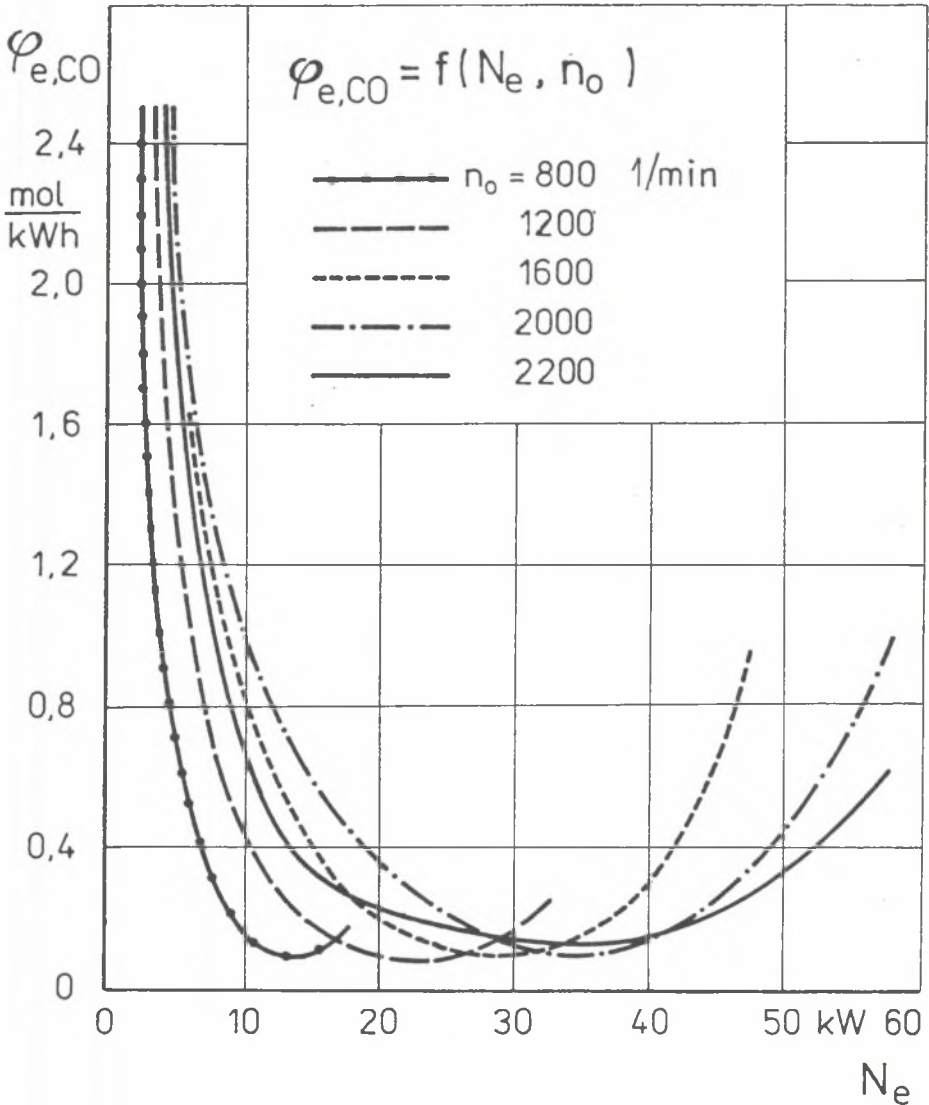
Rozpatrując wskaźnik  $\varphi_{p,CO}$  (rys. 2) otrzymuje się jakościowo inny obraz, tzn. szczególnie niedobre warunki występują w obszarach niskich obciążeń, przy niskich i średnich prędkościach obrotowych. Przy wysokich obciążeniach wskaźnik ten nie osiąga zbyt dużych wartości. Najbardziej korzystne warunki pracy badanego silnika, ze względu na wskaźnik  $\varphi_{p,CO}$ , występują w obszarze średnich mocy, w całym zakresie prędkości obrotowej.



Rys. 2. Względny wskaźnik emisji tlenku węgla; silnik wysokoprężny SW400

Fig. 2. Relative index of emission of carbon monoxide, Diesel engine SW400

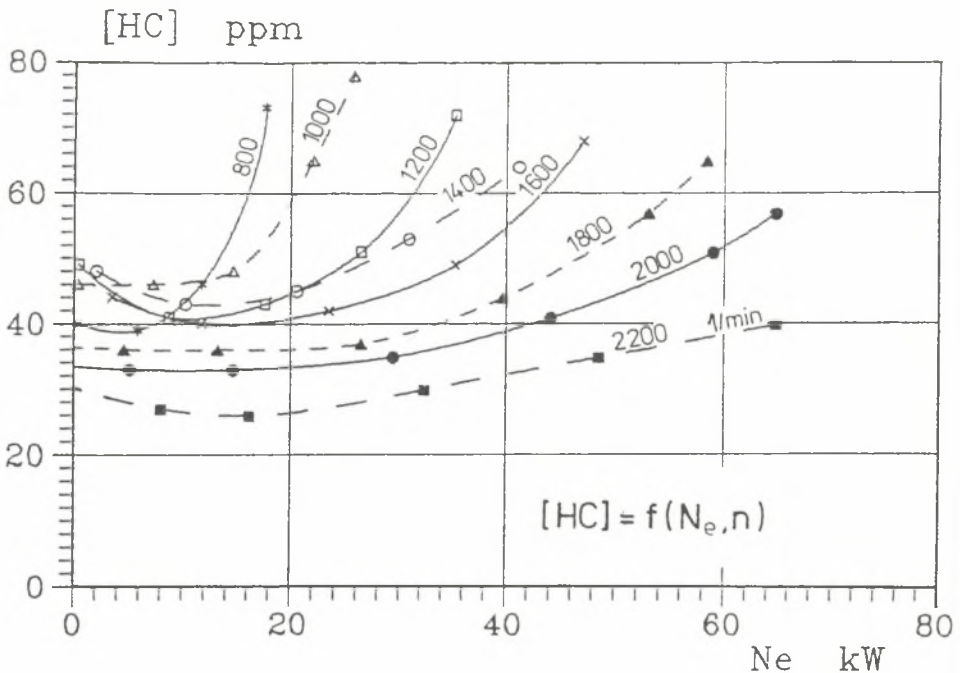
Charakter przebiegu wskaźnika  $\varphi_{e,CO}$  emisji tlenku węgla w odniesieniu do mocy efektywnej (rys. 3) jest podobny do przebiegu wskaźnika  $\varphi_{p,CO}$ . W tym przypadku o niekorzystnej sytuacji w zakresie małych mocy decyduje jednak pewien formalizm matematyczny (dzielenie przez wartości dążące do zera,  $N_e \rightarrow 0$ ).



Rys. 3. Względny wskaźnik emisji tlenku węgla; silnik wysokopięny SW400

Fig. 3. Relative index of emission of carbon monoxide; Diesel engine SW400





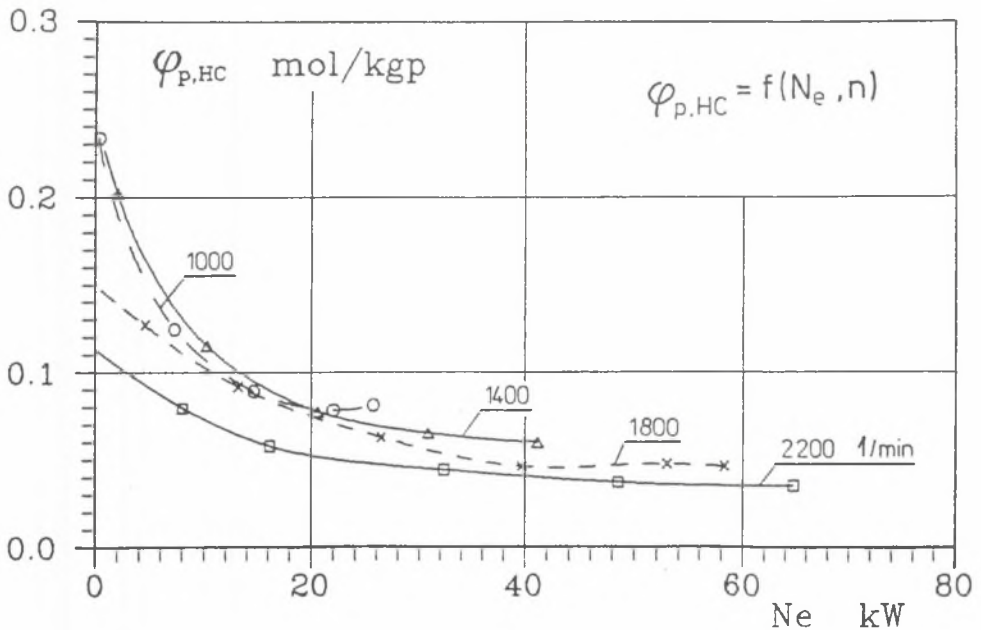
Rys. 4. Sumaryczny udział molowy węglowodorów [HC] w spalinach silnika wysokoprężnego SW400

Fig. 4. Molar fraction of hydrocarbons [HC] in the exhaust gas of the Diesel engine SW400

Jakościowo inaczej kształtuje się także charakterystyka molowego udziału węglowodorów [HC] (rys. 4.) w porównaniu z charakterystyką względnego wskaźnika emisji węglowodorów  $\varphi_{p,HC}$  (rys. 5). Molowy udział [HC] osiąga najwyższe wartości w zakresie niższych prędkości obrotowych i wysokich obciążeń, podczas gdy dla wysokich prędkości i niskich obciążeń zawartość [HC] jest niższa. Natomiast analizując przebiegi wskaźnika  $\varphi_{p,HC}$  szczególnie niekorzystne warunki obserwuje się w obszarach niskich obciążeń, przy niskich i średnich prędkościach obrotowych. W zakresie wysokich obciążeń i wysokich prędkości wskaźnik ten osiąga wartości najniższe.

Można przyjąć, że przedstawiona sumaryczna emisja [HC] dotyczy węglowodorów alifatycznych i alicyklicznych, ponieważ wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne występują na znacznie niższym poziomie stężeń [7].

Powyższą analizę przeprowadzono także w odniesieniu do emisji tlenków azotu  $NO_x$ . Udział molowy  $[NO_x]$  w zależności od mocy i prędkości obrotowej silnika przedstawiono na rys. 6. Stosując opracowany algorytm wyznaczono względny wskaźnik emisji  $\varphi_{p,NO_x}$  – wzór (20) i przedstawiono na rys. 7. Rów-



Rys. 5. Względny wskaźnik emisji węglowodorów; silnik wysokoprężny SW400

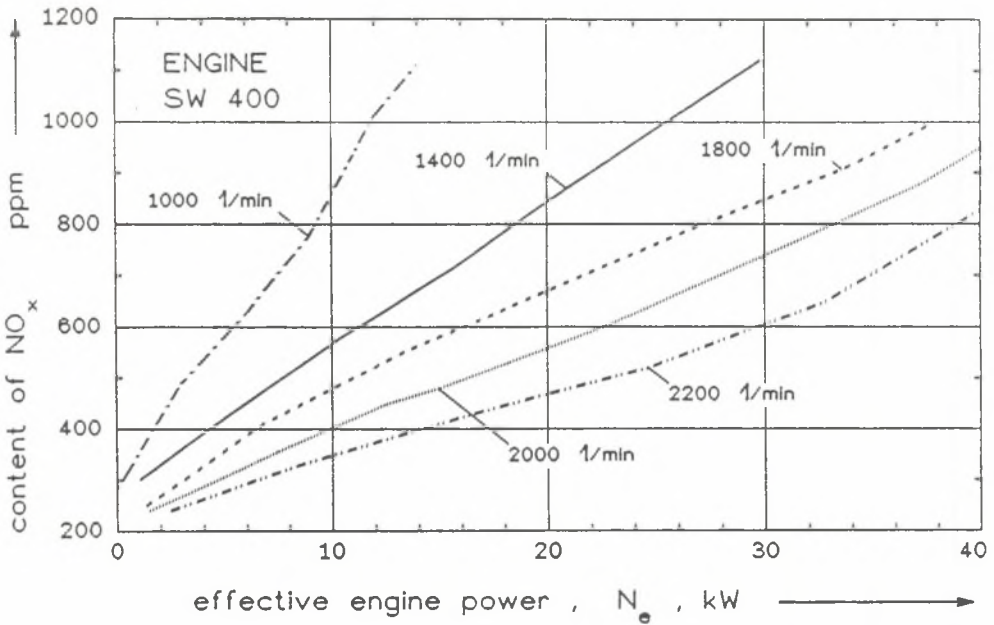
Fig. 5. Relative index of emission of hydrocarbons; Diesel engine SW400

niez w tym przypadku analizowane funkcje, przedstawione na rysunkach 6 i 7, wykazują różnice jakościowe.

### 3.2. Wskaźniki emisji dla silnika z zapłonem iskrowym

Podobne badania przeprowadzono dla silnika 126A1.076/E z zapłonem iskrowym. Charakterystykę wskaźnika  $\varphi_{p,CO}$  emisji tlenku węgla w odniesieniu do strumienia zużywanego paliwa w całym polu pracy silnika przedstawiono na rys. 8. Najbardziej korzystne warunki pracy badanego silnika o zapłonie iskrowym, ze względu na wskaźnik  $\varphi_{p,CO}$ , występują w obszarze średniej prędkości obrotowej, w całym zakresie osiągniętych mocy.

Porównując wyniki przedstawione na rysunkach 2 i 8, można stwierdzić podstawowe jakościowe i ilościowe różnice pomiędzy charakterystykami toksyczności silnika z zapłonem samoczynnym i silnika z zapłonem iskrowym.

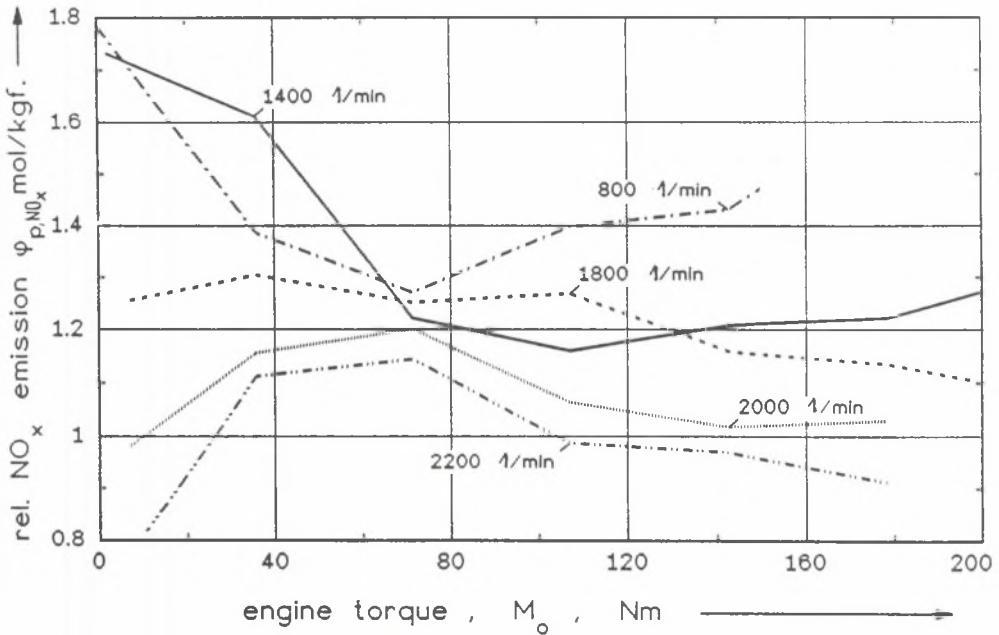


Rys. 6. Udział molowy tlenków azotu [NO<sub>x</sub>] w spalinach silnika wysokoprężnego SW400

Fig. 6. Molar fraction of nitrogen oxides [NO<sub>x</sub>] in the exhaust gas of the Diesel engine SW400

#### 4. PODSUMOWANIE

Analiza pracy silników pod względem emisji tlenku węgla, węglowodorów i tlenków azotu wykazuje, że branie pod uwagę tylko udziałów molowych substancji toksycznych jest niewystarczające. Bardziej odpowiednimi do tego celu wielkościami są zdefiniowane względne wskaźniki emisji, ponieważ uwzględniają parametry eksploatacyjne silnika, przez co pełniej ujmują istotę badanych procesów w aspekcie ekologicznym. Dla ilustracji przedstawiono charakterystyki udziałów molowych i wskaźników emisji wybranych składników szkodliwych w całym polu pracy silnika wysokoprężnego i silnika z zapłonem iskrowym. Dla każdego składnika uzyskano jakościowo różne kształtowanie się charakterystyk udziałów molowych i wskaźników względnych. Na ich podstawie określono najbardziej korzystne obszary pracy silnika ze względu na emisję poszczególnych składników. Stwierdzono, że obszary te dla poszczególnych substancji nie pokrywają się, dlatego też należy łączyć różne metody obniżania emisji. Wyznaczone charakterystyki umożliwiają także określenie obszarów pracy silnika o najwyższej koncentracji składników



Rys. 7. Względny wskaźnik emisji tlenków azotu; silnik wysokoprężny SW400

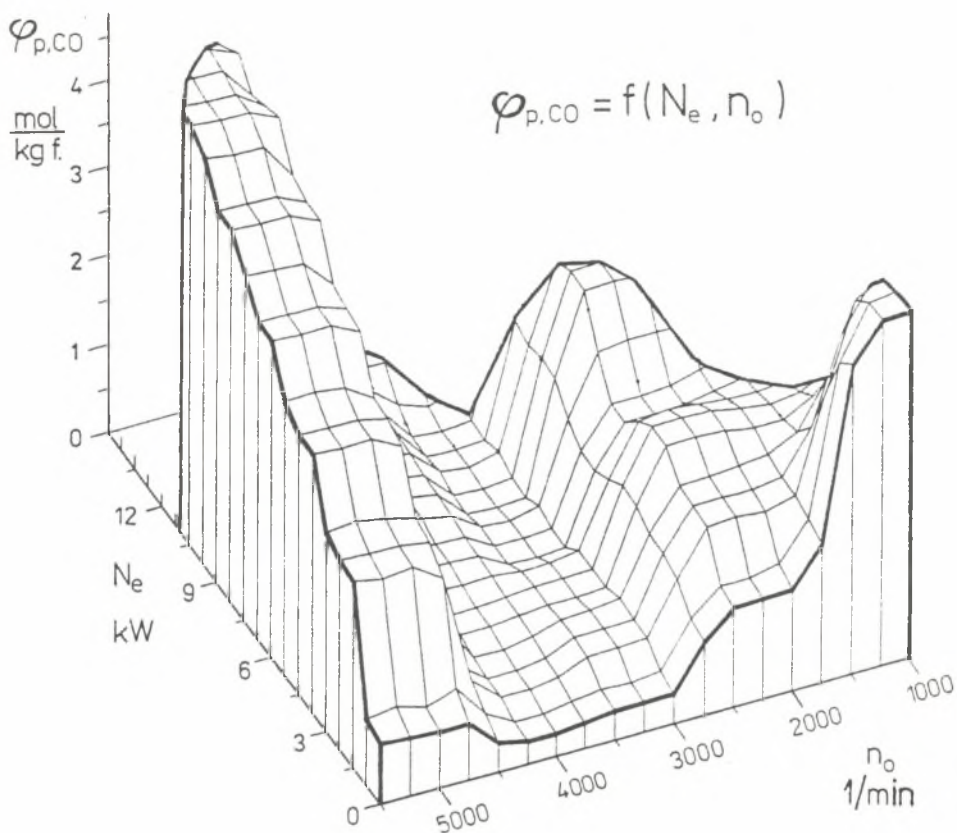
Fig. 7. Relative index of emission of nitrogen oxides; Diesel engine SW400

toksycznych. Pozwala to na wytyczanie kierunków i metod działań mających na celu redukcję emisji substancji szkodliwych. Przytoczone rezultaty potwierdzają celowość stosowania i praktyczną przydatność zdefiniowanych wskaźników. Ponadto wyniki przeprowadzonych badań (rys. 2 i 8) wykazały podstawowe jakościowe i ilościowe różnice pomiędzy charakterystykami emisji szkodliwych składników spalin silnika z zapłonem samoczynnym i silnika z zapłonem iskrowym.

Główne cele prowadzonych badań emisji substancji toksycznych, obejmujące:

- opracowanie ogólnego matematycznego modelu, na podstawie którego możliwe będzie prognozowanie emisji dla zadawanych cykli pracy silnika,
- określenie najbardziej korzystnych obszarów pracy badanych silników,
- wytyczanie kierunków działania i opracowywanie metod obniżania emisji substancji szkodliwych, szczególnie w najbardziej niekorzystnych obszarach pracy silników,

są przedmiotem zainteresowania aktualnie realizowanych prac i będą rozwijane w ich kolejnych etapach.



Rys. 8. Względny wskaźnik emisji tlenku węgla; silnik z zapłonem iskrowym 126A1.076/E

Fig. 8. Relative index of emission of carbon monoxide; spark-ignition engine 126A1.076/E

## LITERATURA

- [1] Bernhardt M., Michałowska J., Radzimirski S.: Motoryzacyjne skażenie powietrza, WKiŁ, Warszawa 1980.
- [2] Postrzednik S.: Wykorzystanie skorygowanego składu spalin do oceny jakości procesu. Gospodarka Paliwami i Energią. Nr 1, 1989, s. 1-3.

- [3] Postrzednik S., Żmudka Z.: Emission factors of toxic substances in various working points of internal combustion engines, Second International Conference on Combustion Technologies for a Clean Environment, Lisbon 1993.
- [4] Postrzednik S., Żmudka Z.: Ecological indices of internal combustion engines, Third International Symposium on Small Diesel Engines CI-MAC'94, Warszawa 1994.
- [5] Szargut J.: Termodynamika, PWN, Warszawa 1985.
- [6] Tandara V.: Einfluss der ökologischen Aspekte auf die Entwicklung der Verbrennungsmotoren, 3-rd International AUTECH Congress for Automotive Engineering, Stuttgart 1991.
- [7] Żmudka Z., Postrzednik S., Wacowski J., Ogierman L.: Struktura węglowodorów spalin silnikowych ze szczególnym uwzględnieniem wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych. International Combustion Engines KONES'94, Lublin – Nałęczów 1994.
- [8] Wytyczne obliczenia stanu zanieczyszczenia powietrza atmosferycznego, Ministerstwo Administracji, Gospodarki Terenowej i Ochrony Środowiska. Wyd. PZHiTS nr 359/II. Warszawa 1981/1983.

Recenzent: Dr hab. inż. Zbigniew Rudnicki

Wpłynęło do Redakcji 10. 04. 1995 r.

## Abstract

The harmful effect of automobiles, powered by internal combustion engines, on the environment is considered through specific driving tests. The results of the test depend on:

- the characteristics of the toxicity of the internal combustion engine.
- the test procedures (program of vehicle motion),
- type of the vehicle.

The object of interest presented in this paper is the first of the above mentioned conditions.

For the evaluation of the internal combustion engines with regard to the content of toxic substances in the exhaust gas, the relative emission indices of toxic substances (one  $\varphi_{p,i}$  – in relation to the fuel consumption, and the other  $\varphi_{e,i}$  – to the power output) are defined. Index  $\varphi_{p,i}$  can be applied in the whole operation range. Index  $\varphi_{e,i}$  is less suitable for the evaluation of engine at idling and small loads; for as  $N_e \rightarrow 0$  the value of  $\varphi_{e,i} \rightarrow \infty$ . From the calculated

individual indices of emission for each toxic substance, the corresponding general indices of the exhaust gas toxicity can be obtained.

Analysis of the engine with respect to the emission of CO, HC and NO<sub>x</sub> indicates that consideration of only the molar fractions of the toxic substances is not satisfactory. More appropriate quantities are the mentioned relative emission indices, because they take the engine operation parameters into consideration. For illustration, selected emission indices of Diesel engine and spark-ignitions (fig. 2, fig. 8) show the principal qualitative and quantitative differences between toxicity characteristics in the whole operation range of Diesel engine and spark-ignition engine.

Major objectives of the realized research:

- elaboration of the general mathematical model, from which the forecast of the toxic substances emission for the specific driving cycles is possible,
- determination of the most appropriate running conditions of the tested engines,
- deduction of the method of reduction of CO emission at the most unfavourable operation ranges of Diesel engines SW400 (used to power mining locomotives), particularly at idling.

The mentioned results confirmed the purpose of application and the practical suitability of the defined indices.

## LITERATURA

- [1] Wolski J.: Obliczenia radiacyjnej wymiany ciepła w piecu komorowym przy zastosowaniu modelu pasmowego promieniowania gazów. Praca dypl. magisterska. Pol. Śl., Gliwice 1992.
- [2] Rudnicki Z.: Radiacyjny przepływ ciepła w piecach przemysłowych. Skrypt Pol. Śl., Gliwice 1985.
- [3] Kostowski E.: Promieniowanie cieplne. PWN, Warszawa 1993.

Recenzent: Dr hab. inż. Zbigniew RUDNICKI

Wpłynęło do Redakcji: 8. 02. 1995 r.

**Abstract**

In the paper a method of determining of an emissivity of an oil flame is presented with some results of measurements. Measurements were performed in the experimental combustion chamber using the narrow angle radiation pyrometer. For the purpose of this investigation, flame volume is understood as a visible volume of hot gases and burning particles in the flame region.

The sensitivity of the pyrometer is only for radiation in a band between 4,5 and 5,5  $\mu\text{m}$ . This band corresponds to a "window" in gas absorption bands. As a result, pyrometer sees only radiation of the solid soot particles and small droplets of the fuel in the flame volume. The result of measurement is the temperature shown by a pyrometer. This temperature corresponds to the intensity of radiation coming to the pyrometer from the direction of the flame.

Method of determining of flame emissivity uses a Schmidt method, which is based on the results of measurements of radiation intensity coming from the flame with a cold- and hot background. As a cold background, water cooled metal box was used while as the hot background the hot wall behind the flame is taken. The additional information needed is intensity of radiation coming off the hot wall of the chamber – in this case temperature of the wall is measured by a thermocouple.

Measurements were performed along the flame axis and values of intensity  $i_h$  with a hot background,  $i_c$  with a cold background and  $i_w$  of the wall was determined. Using these results emissivity of the flame along its axis is determined – this emissivity corresponds to a density of solid particles in the flame volume. Results of measurements and calculations are presented in tables and in figures.