

Jan Górzyński*

METODY UKŁADU RÓWNAŃ BILANSOWYCH OKREŚLANIA WSKAŹNIKÓW SKUMULOWANEJ EMISJI ZANIECZYSZCZEŃ I SKUMULOWANEGO ZUŻYCIA WODY DLA POJEDYNCZEGO WYROBU

Wykorzystując metody układu równań bilansowych stosowane do określania wskaźników skumulowanego zużycia energii, opracowano metodę określania skumulowanej emisji zanieczyszczeń atmosferycznych dla pojedynczego wyrobu. Na bazie elementów teorii grafów wyprowadzono układ równań bilansu skumulowanej emisji zanieczyszczeń, który zastosowano do określania wskaźnika skumulowanej emisji zanieczyszczeń dla procesu wytwarzania odlewu żeliwnego. Stosując analogiczne postępowanie uzyskano układ równań bilansu skumulowanego zużycia wody, umożliwiający określenie wskaźników skumulowanego zużycia wody charakteryzujących wyroby budowlane.

1. Wstęp

Emisje zanieczyszczeń powstające w procesach technologicznych wytwarzania wyrobów przemysłowych wyznacza się na podstawie pełnej analizy procesów, uwzględniającej wszystkie dostarczane surowce energetyczne i nieenergetyczne oraz wszystkie substancje zanieczyszczające generowane w tych procesach i odprowadzane do środowiska. W praktyce emisja zanieczyszczeń wytwarzanych w procesach przemysłowych jest określana na podstawie wskaźników skumulowanej emisji poszczególnych substancji zanieczyszczających lub równoważnej emisji zanieczyszczeń. Do wyznaczania wskaźników skumulowanej emisji zanieczyszczeń można stosować metody analogiczne do stosowanych w obliczeniach wskaźników skumulowanego zużycia energii [1], [2], [3]. Możliwe jest zastosowanie następujących metod określania wskaźników skumulowanej emisji zanieczyszczeń:

- metody analizy procesów zwanej metodą sekwencyjną,
- metody bilansu skumulowanej emisji zanieczyszczeń dla pojedynczego procesu,
- metody bilansu skumulowanej emisji zanieczyszczeń dla wielu procesów.

* dr inż. – adiunkt w ITB

Jeśli emisja zanieczyszczeń pochodzi wyłącznie z wykorzystania energii i znane są wskaźniki jej skumulowanego zużycia, wówczas na podstawie tych wskaźników i energochłonności wyrobów oraz wskaźników skumulowanej emisji zanieczyszczeń charakteryzujących nośniki energii możliwe jest określenie wskaźników skumulowanej emisji zanieczyszczeń dla rozpatrywanych wyrobów [4].

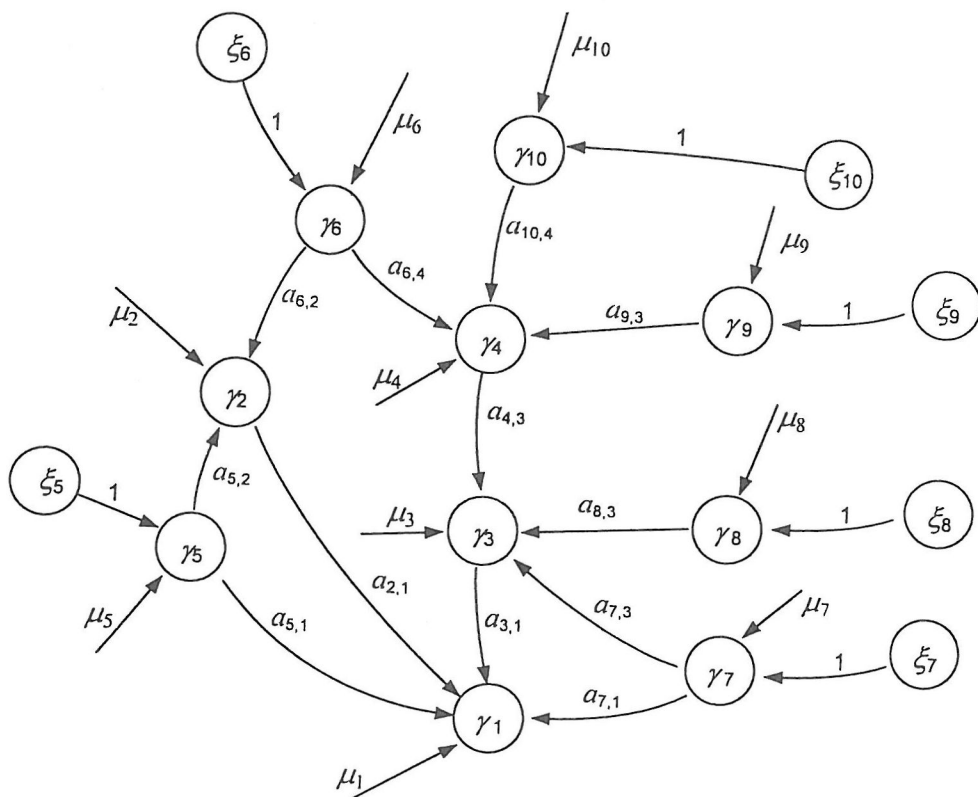
W metodzie analizy procesów (sekwencyjnej) określania wskaźników skumulowanej emisji zanieczyszczeń wykorzystuje się analizę sieci powiązań procesów wytwarzania wyrobów analizowanych wstecz, rozpoczynając od procesu rozpatrywanego, przez kolejne z nich, aż do tych procesów, które wywołują pomijalnie mały przyrost wartości wskaźnika skumulowanej emisji zanieczyszczeń. Opis metody analizy procesów w zastosowaniu do emisji wraz z przykładem obliczeniowym zamieszczono w artykule [4].

W większości zakładów wytwarza się określoną liczbę wyrobów, których procesy wytwarzania nie są wzajemnie powiązane. W takich przypadkach zastosowanie teorii grafów, omówione szczegółowo w pracy [5], pozwala na sformułowanie układu równań bilansowych dla poszczególnych operacji procesu i na tej podstawie określenie skumulowanej emisji zanieczyszczeń występujących w procesie wytwarzania dowolnego wyrobu w danym ciągu technologicznym przedsiębiorstwa. W przypadku jednoczesnego określania skumulowanej emisji zanieczyszczeń dla wielu wyrobów lub dla wyrobów wytwarzanych w całej gospodarce narodowej można zastosować metodę układu równań bilansowych, opartą na wykorzystaniu teorii przepływów międzygałęziowych, przedstawioną w pracy [2]. Metody układu równań bilansowych były wielokrotnie wykorzystywane do poszukiwania wskaźników skumulowanego zużycia energii i są szczegółowo omówione w [1], [2], [3].

2. Metoda układu równań bilansowych dla pojedynczego wyrobu

Zastosowanie metody układu równań bilansowych do określania wskaźników skumulowanej emisji zanieczyszczeń dla pojedynczych wyrobów przemysłowych wymaga znajomości kilku podstawowych pojęć z teorii grafów. Niezbędne pojęcia z tego zakresu zaczerpnięte z pracy [6] zestawiono i omówiono w publikacjach [5], [7].

W celu obliczenia wskaźnika skumulowanej emisji zanieczyszczeń charakteryzującego dowolny wyrób w rozpatrywanym przedsiębiorstwie produkcyjnym należy najpierw opracować uogólniony schemat procesu produkcyjnego z uwzględnieniem wszystkich występujących w nim operacji technologicznych. Prosty przykład takiego schematu pokazano na rysunku 1. Produktowi wytworzonemu w każdej operacji procesu technologicznego przyporządkowuje się wierzchołek grafu, opatrzony etykietą oznaczającą zmienną γ , wyrażającą skumulowaną emisję zanieczyszczeń charakteryzującą dany produkt. Do poszczególnych wierzchołków (operacji technologicznych) doprowadza się: półwyrób końcowy z wcześniejszych wierzchołków, surowce i materiały technologiczne oraz nośniki energii w ilościach niezbędnych do wytworzenia określonej ilości półwyrobu reprezentowanego przez dany wierzchołek. Ponadto w poszczególnych operacjach technologicznych mogą powstawać zanieczyszczenia, które również powinny być uwzględniane w przepływach emisji.



Rys. 1. Przykład grafu przepływu emisji danej substancji zanieczyszczającej w procesie wytwarzania wyrobu

Jeżeli w danym przedsiębiorstwie w różnych procesach technologicznych ma zastosowanie m różnych surowców i materiałów technologicznych oraz nośników energii (pierwotnych i wtórnych), to uogólniony graf przepływu emisji związanej z danym procesem produkcyjnym będzie zawierał $m + n$ wierzchołków (n jest liczbą operacji technologicznych procesu wytwarzania wyrobu). W przypadku uogólnionego grafu procesu produkcyjnego, pokazanego na rysunku 1, liczba operacji cząstkowych procesu wynosi $n = 10$, a liczba dostarczanych z zewnątrz surowców, materiałów i nośników energii wynosi $m = 6$. Dlatego liczba wszystkich wierzchołków grafu wynosi $m + n = 16$. Każda krawędź reprezentująca nośnik energii, materiał technologiczny, wprowadzana do procesu produkcyjnego z zewnątrz do wierzchołka oznaczonego ξ_p , opatrzonego etykietą zmienną niezależną od wartości równej skumulowanej emisji zanieczyszczeń jednostki – i -tego nośnika energii lub materiału technologicznego – ma mnożnik wagowy krawędzi wynoszący $a_{ij} = 1$. Uogólniony graf przepływu skumulowanej emisji związanej z procesem produkcyjnym – w rozpatrywanym przypadku – składa się z $m + n$ wierzchołków, w tym n wierzchołków (w rozpatrywanym przypadku $n = 10$), z etykietą zmienną γ , oraz

m wierzchołków z etykietą zmiennej niezależnej (wchodzące z zewnątrz) ξ_i , zwanych również wierzchołkami źródłowymi [7]. Posługując się przedstawioną konstrukcją grafu, można go opisać za pomocą macierzy mnożników wagowych [7].

Tak więc w grafie przepływu emitowanych zanieczyszczeń każdy wierzchołek reprezentuje określony półwyrob, który jest wyróżniony etykietą zawierającą zarówno nazwę półwyrobu, jak i charakteryzującą go skumulowaną emisję zanieczyszczeń. Etykieta ta może występować na rysunku danego grafu w postaci liczby kodowej (rys. 1), [5], [7]. Krawędź skierowana z wierzchołka γ_i do wierzchołka γ_j oznacza, że zmienny przepływ emisji γ_j zależy od zmiennej γ_i , a nie odwrotnie. Każdej krawędzi a_{ij} przypisuje się liczbę określającą krotność emisji zanieczyszczeń przepływającej z wierzchołka γ_i do γ_j . Czyli emisja przepływająca z wierzchołka γ_i do wierzchołka γ_j wyrazi się iloczynem $a_{ij}\gamma_i$. Wierzchołek odpowiadający zmiennej niezależnej ξ_i nie ma krawędzi dochodzących, lecz tylko wychodzące. Wierzchołki ξ_i określają wszystkie emisje zanieczyszczeń wprowadzane z zewnątrz do poszczególnych ogniw procesu. Ponadto do każdego wierzchołka dopływa emisja wewnętrzna μ_j substancji zanieczyszczającej, generowanej w procesie bezpośredniego wytwarzania półwyrobu j .

Każdy wierzchołek grafu oznaczony symbolem γ_i reprezentuje jedno równanie układu przepływu emisji zanieczyszczeń, w którym wartość γ_i jest równa sumie iloczynów wag wszystkich krawędzi wchodzących i etykiet wierzchołków początkowych γ_i tych krawędzi, powiększonej o emisję μ_j pochodzącą z procesu j . Na przykład dla wierzchołka γ_3 równanie bilansu strumieni zanieczyszczeń ma postać:

$$a_{4,3} \gamma_4 + a_{7,3} \gamma_7 + a_{8,3} \gamma_8 + \mu_3 = \gamma_3 \quad (1)$$

Podobnie dla wierzchołka γ_6 , reprezentującego półwyrob zasilany bezpośrednio w nośniki energii lub półwyroby dostarczane z zewnątrz, reprezentowane przez wierzchołek ξ_6 , otrzymuje się równanie:

$$\xi_6 + \mu_6 = \gamma_6 \quad (2)$$

W ten sposób dla sieci operacji reprezentowanych grafem pokazanym na rysunku 1 można napisać dziesięć równań typu (1) lub (2).

Biorąc pod uwagę równości (1) i (2), równanie bilansu strumieni emisji zanieczyszczeń dla j -tego wyrobu końcowego można zapisać w ogólnej postaci:

$$\sum_{i \neq j} a_{ij} \gamma_i + \xi_j + \mu_j = \gamma_j \quad (3)$$

gdzie: a_{ij} – mnożniki wagowe przepływu emisji z półwyrobu i do półwyrobu j ,
 γ_i, γ_j – skumulowane emisje zanieczyszczeń charakteryzujące półwyroby powstające w procesach i i j ,
 ξ_j – skumulowana emisja zanieczyszczeń związana z doprowadzanymi z zewnątrz nośnikami energii, materiałami i półwyrobami,
 μ_j – emisje zanieczyszczeń powstających bezpośrednio w j -tym ogniwie sieci operacji.

\mathbf{A}^T – macierz mnożników wagowych a_{ij} przepływu emisji zanieczyszczeń

$$\mathbf{A}^T = \begin{bmatrix} 0 & a_{21} & \dots & a_{n1} \\ a_{12} & 0 & \dots & a_{n2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{1n} & a_{2n} & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

γ – wektor wskaźników skumulowanej emisji zanieczyszczeń charakteryzujących wszystkie półwyroby

$$\gamma = \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \dots \\ \gamma_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

ξ – wektor skumulowanej emisji zanieczyszczeń doprowadzanych z zewnątrz w postaci nośników energii, materiałów i półwyrobów

$$\xi = \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \dots \\ \xi_n \end{bmatrix} \quad (9)$$

μ – wektor bezpośredniej emisji zanieczyszczeń powstającej w poszczególnych operacjach procesu wytwarzania danego wyrobu

$$\mu = \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \\ \dots \\ \mu_n \end{bmatrix} \quad (10)$$

Mnożąc lewostronnie równanie (6) przez macierz odwrotną $(\mathbf{I} - \mathbf{A}^T)^{-1}$, przy założeniu że macierz $(\mathbf{I} - \mathbf{A}^T)$ jest nieosobliwa, otrzymuje się:

$$\gamma = (\mathbf{I} - \mathbf{A}^T)^{-1} (\xi + \mu) \quad (11)$$

Równanie (11) formułuje się w przypadku półwyrobów, to znaczy tych produktów, które są zużywane częściowo lub całkowicie w innych ogniach procesu wytwarzania danego wyrobu oraz w przypadku wyrobu końcowego tego procesu. Do półwyrobów zalicza się również nośniki energii. Macierz $(\mathbf{I} - \mathbf{A}^T)^{-1}$ powinna obejmować wszystkie ogniwa procesu wytwarzania półwyrobów w całej sieci operacji prowadzących do wytworzenia danego produktu końcowego.

Aby znaleźć skumulowaną emisję zanieczyszczeń dla określonego wyrobu produkowanego w danym przedsiębiorstwie, należy rozwiązać układ równań (11), uwzględniając

że przepływ wszystkich dóbr (półwyrobów) odnosi się na przykład do określonej masy lub jednej sztuki wyrobu. Przy obliczaniu skumulowanej emisji zanieczyszczeń wyrobu najpierw wydziela się wszystkie półwyroby (nośniki energii pierwotne i wtórne oraz materiały, a także typowe części, podzespoły i zespoły), które uzyskuje się z zewnątrz i które tworzą wyrób końcowy. Dzięki określeniu ilości półwyrobów wchodzących do procesu technologicznego z zewnątrz, można wyznaczyć macierz kolumnową ξ skumulowanej emisji zanieczyszczeń wnoszonych przez nie do procesu. Jednocześnie określa się elementy macierzy mnożników wagowych A^T uogólnionego grafu przepływu emisji, opisującego analizowany proces produkcyjny.

Rozwiązując układ równań algebraicznych liniowych (11), otrzymuje się skumulowaną emisję zanieczyszczeń charakteryzującą wyrób końcowy oraz wszystkie półwyroby powstające w ogniwach pośrednich (częstkowych) procesu, które wpływają na poziom skumulowanej emisji zanieczyszczeń dotyczącą wyrobu końcowego. Jednocześnie uzyskuje się informacje, jakie czynniki mają największy wpływ na skumulowaną emisję zanieczyszczeń związaną z wytworzeniem danego wyrobu końcowego.

3. Metoda układu równań bilansowych do określania skumulowanego zużycie wody

Metodę obliczania skumulowanej emisji zanieczyszczeń omówioną w punkcie 3 można również zastosować do określania skumulowanego zużycia wody. Postępując się oznaczeniami zamieszczonymi na rysunku 2, równanie bilansu skumulowanego zużycia wody dla j -tego wyrobu końcowego można zapisać w ogólnej postaci:

$$\sum_{i \neq j} c_{ij} w_i + g_j + \chi_j + w_j \quad (12)$$

gdzie: c_{ij} – mnożniki wagowe przepływu skumulowanego zużycia wody z półwyrobem i do półwyrobu j ,
 w_i, w_j – skumulowane zużycie wody charakteryzujące półwyroby powstające w procesach i i j ,
 g_j – bezpośrednie zużycie wody w j -tym ogniwie sieci operacji,
 χ_j – skumulowane zużycie wody związane z dostarczanymi z zewnątrz nośnikami energii, materiałami i półwyrobami.

W równaniu (12) sumowanie dotyczy wszystkich krawędzi reprezentujących dopływy skumulowanego zużycia wody do danego wierzchołka.

Mnożniki wagowe c_{ij} – poza całkowitym zużyciem materiałów i półwyrobów – powinny również uwzględniać częściowe zużycie maszyn i urządzeń oraz straty powstałe podczas operacji przeróbki i transportu półwyrobów poprzedzających rozpatrywane ogniwo sieci operacji. Sposób uwzględniania zużycia maszyn i urządzeń omówiono w pracy [3].

W zapisie macierzowym układ równań (12) przyjmuje postać:

$$C^T w + g + \chi = w \quad (13)$$

lub po przekształceniach otrzymuje się:

$$\mathbf{w} = (\mathbf{I} - \mathbf{C}^T)^{-1} (\boldsymbol{\chi} + \mathbf{g}) \quad (14)$$

\mathbf{C}^T – macierz mnożników wagowych c_{ij} zużycia wody

$$\mathbf{C}^T = \begin{bmatrix} 0 & c_{21} & \dots & c_{n1} \\ c_{12} & 0 & \dots & c_{n2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{1n} & c_{2n} & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

\mathbf{w} – wektor wskaźników skumulowanego zużycia wody charakteryzujących wszystkie półwyroby

$$\mathbf{w} = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \dots \\ w_n \end{bmatrix} \quad (16)$$

$\boldsymbol{\chi}$ – wektor skumulowanego zużycia wody związanego z doprowadzanymi z zewnątrz nośnikami energii, materiałami i półwyrobami

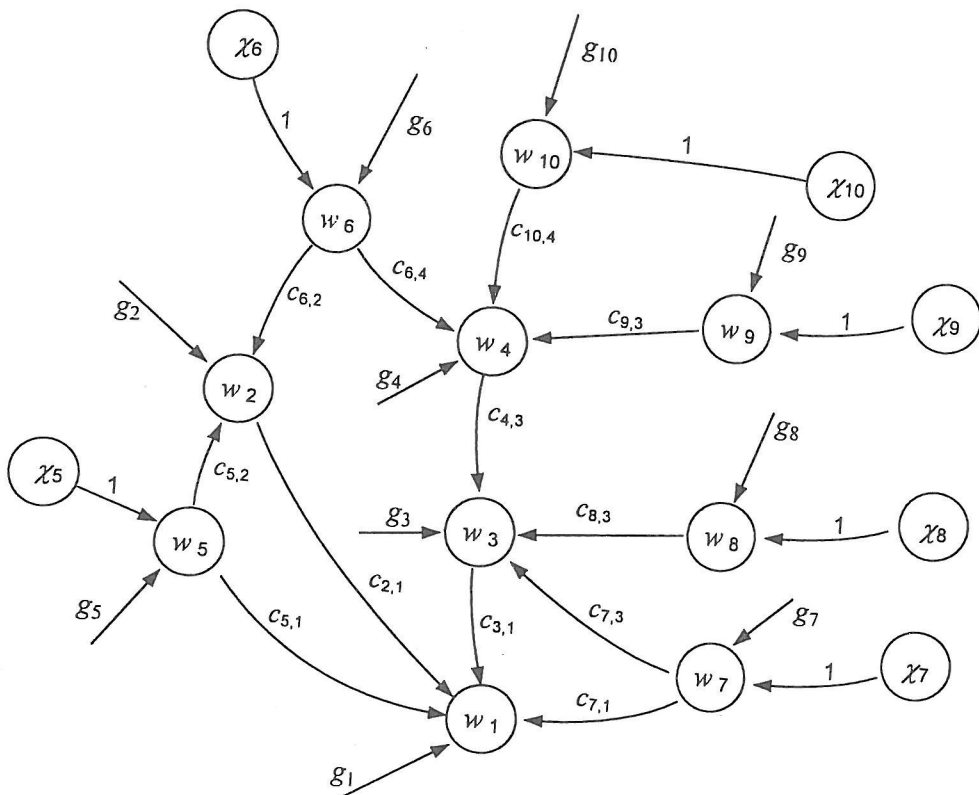
$$\boldsymbol{\chi} = \begin{bmatrix} \chi_1 \\ \chi_2 \\ \dots \\ \chi_n \end{bmatrix} \quad (17)$$

\mathbf{g} – wektor kolumnowy bezpośredniego zużycia wody w j -tej operacji procesu wytwarzania danego wyrobu

$$\mathbf{g} = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \dots \\ g_n \end{bmatrix} \quad (18)$$

Równanie (18), podobnie jak (11), stosuje się zarówno dla półwyrobów, to znaczy tych produktów, które są zużywane częściowo lub całkowicie w innych ogniwach procesu wytwarzania danego wyrobu, jak i dla wyrobu końcowego tego procesu.

Aby znaleźć skumulowane zużycie wody dla określonego wyrobu produkowanego w danym przedsiębiorstwie, należy rozwiązać układ równań (18), uwzględniając że przepływ wszystkich dóbr (półwyrobów) odnosi się na przykład do określonej masy lub jednej sztuki wyrobu.



Rys. 2. Przykład grafu przepływu skumulowanego zużycia wody w procesie wytwarzania danego wyrobu

4. Przykład zastosowania metody układu równań bilansowych do obliczenia wskaźnika skumulowanej emisji dwutlenku węgla

Na podstawie danych zawartych w pracy [7], dotyczących obliczania skumulowanego zużycia energii dla procesu wytwarzania odlewu z żeliwa szarego o masie 5,5 kg, obliczono wskaźnik skumulowanej emisji dwutlenku węgla.

W procesie wytwarzania odlewu wyróżniono 18 następujących operacji technologicznych: 1 – obróbka cieplna odlewu, 2 – usuwanie układu wlewowego, 3 – oczyszczanie odlewu, 4 – wybijanie odlewu, 5 – zalewanie formy, 6 – zabiegi metalurgiczne, 7 – wytopianie metalu, 8 – przetop złomu obiegowego, 9 – składanie formy, 10 – umocnienie rdzenia, 11 – wykonanie rdzenia, 12 – wykonanie rdzennicy, 13 – przerób masy rdzeniowej, 14 – umocnienie półform, 15 – wykonanie półform, 16 – wykonanie modelu, 17 – przerób masy formierskiej, 18 – regeneracja masy formierskiej.

Układ równań do obliczenia skumulowanej emisji zanieczyszczeń generowanych w rozpatrywanym procesie wytwarzania odlewu żeliwnego, zapisany w postaci ogólnej za pomocą wzoru (5), podano niżej. Zgodnie z pracą [7] założono, że skumulowane emisje zanieczyszczeń półwyrobów w operacjach 8, 12 i 16 są pomijalnie małe, dlatego otrzymano układ 15 równań.

Układ równań bilansu skumulowanej emisji zanieczyszczeń:

1. $a_{2,1}\gamma_2 + \mu_1 - \gamma_1 = 0$
2. $a_{3,2}\gamma_3 + \xi_2 - \gamma_2 = 0$
3. $a_{4,3}\gamma_4 + \xi_3 - \gamma_3 = 0$
4. $a_{5,4}\gamma_5 - \gamma_4 = 0$
5. $a_{6,5}\gamma_6 + a_{9,5}\gamma_9 + \xi_5 - \gamma_5 = 0$
6. $a_{7,6}\gamma_7 - \gamma_6 = 0$
7. $\xi_7 + \mu_7 - \gamma_7 = 0$
8. $a_{10,9}\gamma_{10} + a_{14,9}\gamma_{14} - \gamma_9 = 0$
9. $a_{11,10}\gamma_{11} + \xi_{10} - \gamma_{10} = 0$
10. $a_{13,11}\gamma_{13} + \xi_{11} - \gamma_{11} = 0$
11. $\xi_{11} - \gamma_{11} = 0$
12. $a_{15,14}\gamma_{15} - \gamma_{14} = 0$
13. $a_{17,15}\gamma_{17} + \xi_{15} - \gamma_{15} = 0$
14. $a_{18,17}\gamma_{18} + \xi_{17} - \gamma_{17} = 0$
15. $\xi_{18} - \gamma_{18} = 0$

Układ równań (19) rozwiązano w celu znalezienia wskaźnika skumulowanej emisji dwutlenku węgla dla wyrobu końcowego. Emisja CO₂ wprowadzana za pośrednictwem materiałów technologicznych, półwyrobów i nośników energii występuje w większości operacji technologicznych. Niżej podano obliczone sumaryczne wartości emisji ξ_j dla odpowiednich operacji: $\xi_2 = 0,1490$ kg CO₂, $\xi_3 = 1,2675$ kg CO₂, $\xi_5 = 0,04254$ kg CO₂; $\xi_7 = 1,4495$ kg CO₂; $\xi_{10} = 0,6448$ kg CO₂; $\xi_{11} = 0,1955$ kg CO₂; $\xi_{13} = 0,4524$ kg CO₂; $\xi_{15} = 7,136$ kg CO₂; $\xi_{17} = 0,00866$ kg CO₂; $\xi_{18} = 0,001062$ kg CO₂.

Wartości mnożników wagowych a_{ij} oraz wartości emisji zewnętrznych ξ_j ustala się na podstawie wyników badań przeprowadzanych na odlewni. W rozpatrywanym przykładzie do ustalenia tych wielkości posłużyły dane empiryczne ustalone przez autora pracy [7], który opracował je i wykorzystał do wyznaczenia wskaźników skumulowanego zużycia energii odlewu. Na podstawie danych podanych w tej pracy na stronach 56–61 otrzymano: $a_{2,1} = 1,111$; $a_{3,2} = 1,0$; $a_{4,3} = 1,0$; $a_{5,4} = 1,0$; $a_{6,5} = 3,122$; $a_{7,6} = 1,0$; $a_{10,9} = 1,08$; $a_{11,10} = 1,0$; $a_{13,11} = 1,077$; $a_{14,9} = 1,08$; $a_{15,14} = 1,0$; $a_{17,15} = 1,12$; $a_{18,17} = 0,946$.

Emisja bezpośrednia CO₂ występuje jedynie w procesach 1 i 7 i jest generowana podczas spalania oleju opałowego i koksu w procesie wytopu oraz podczas spalania gazu ziemnego w procesie wyżarzania odlewu. Na podstawie obliczeń otrzymano: $\mu_1 = 0,1522$ kg CO₂, $\mu_7 = 0,3528$ kg CO₂.

Emisję powstającą bezpośrednio podczas operacji określono na podstawie wskaźników skumulowanego zużycia energii charakteryzujących nośniki energii oraz wskaźników emisji charakteryzujących poszczególne paliwa pierwotne.

Po uwzględnieniu powyższych wartości a_{ij} , μ_i , ξ_j i po rozwiązaniu układu równań (19) otrzymuje się wskaźnik skumulowanej emisji dwutlenku węgla generowanego w procesie wytwarzania odlewu żeliwnego, wynoszący $\gamma_1 = 3,308$ kg CO₂/kg.

5. Podsumowanie

Wykorzystując elementy teorii grafów, wyprowadzono układ równań bilansu skumulowanej emisji zanieczyszczeń, który może być wykorzystany do określenia wskaźników

skumulowanej emisji dla pojedynczych wyrobów przemysłowych. Otrzymany układ równań zastosowano do określania wskaźnika skumulowanej emisji zanieczyszczeń dla procesu wytwarzania odlewu żeliwnego.

Stosując analogiczne postępowanie, uzyskano układ równań bilansu skumulowanego zużycia wody, umożliwiający określenie wskaźników skumulowanego zużycia wody charakteryzujących wyroby przemysłowe.

Literatura

- [1] Bibrowski S. red.: *Energochłonność skumulowana*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1983
- [2] Szargut J.: *Analiza energetyczna i ekonomiczna w energetyce przemysłowej*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1983
- [3] Szargut J.: *Problemy obliczania i stosowania wskaźników ciągnionego zużycia energii*. *Archiwum Energetyki*, 4, 1979, s. 167–180
- [4] Górzyński J.: *Skumulowana emisja zanieczyszczeń materiałów i wyrobów budowlanych*. *Prace Instytutu Techniki Budowlanej – Kwartalnik*, 4 (112), 1999
- [5] Sala A.: *Zmniejszanie Energochłonności*. Międzyresortowe Centrum Naukowe Eksploatacji Majątku Trwałego, Radom 1993
- [6] Deo N.: *Teoria grafów i jej zastosowanie w technice i informatyce*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1980
- [7] Gruszka P.: *Metoda oceny energochłonności skumulowanej maszynowych odlewów żeliwnych*. Praca doktorska, Politechnika Warszawska, Wydział Mechaniczno-Technologiczny, Warszawa 1984
- [8] Ziębik A., Szargut J.: *Podstawy gospodarki energetycznej*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1995
- [9] Szargut J., Ziębik A.: *Podstawy energetyki cieplnej*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1998

EQUATION SYSTEM METHOD FOR THE DETERMINATION OF CUMULATIVE EMISSION FACTORS AND CUMULATIVE CONSUMPTION OF WATER OF SINGLE PRODUCTION PROCESS

Summary

Taking into account the equation system method for the determination of cumulative energy consumption factors a method for the determination of cumulative emission factors is presented. The equations system has been obtained on the basis of graph theory and applied to the determination of cumulative emission factor of a single iron casting. Using similar procedure, the equation system for the determination of cumulative water consumption of building elements has also been elaborated.

Praca wpłynęła do Redakcji 30 XI 1999