

**Renata WALCZAK**

Politechnika Warszawska

Szkoła Nauk Technicznych i Społecznych, Płock

## **SFORMUŁOWANIE WSKAŹNIKÓW OCENY EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ SYSTEMÓW BIOAGROSUSZĄCYCH**

### **Słowa kluczowe**

System bioagrosuszający, efektywność energetyczna, wskaźniki oceny efektywności.

### **Streszczenie**

W pracy przedstawiono zasadę budowy wskaźników oceny efektywności systemów bioagrosuszających. Sformułowano wskaźniki efektywności energetycznej. Zaproponowano zasadę wyznaczania zmiennych procesowych koniecznych do wyznaczenia wskaźników na przykładzie suszarki daszkowej przeznaczonej do suszenia ziarna.

### **Wprowadzenie**

Termin system bioagrosuszający oznacza wyodrębniony z otoczenia i współdziałający z nim, będący funkcjonalną całością, zespół środków technicznych służących do realizacji w zinstrumentalizowany, oczekiwany sposób procesu bioagrosuszenia, zgodnie z wymaganiami, przy istniejących możliwościach, w danych warunkach.

Otoczenie systemu to zbiór elementów do systemu nie należących, ale w bezpośredni sposób oddziałujących na rozpatrywany system bioagrosuszający. System jest zasilany z otoczenia. Do systemu dostarczane są surowce, materiały

i energia, z systemu wyprowadzane są produkty oraz energia. System jest wydzielony z otoczenia za pomocą osłony kontrolnej.

Ze względu na warunki, możliwości i wymagania można przy specyfikacji systemów bioagrosuszających uwzględniać: rodzaje, typy i konfiguracje [1, 2, 3, 5].

Konfiguracja systemu bioagrosuszającego oznacza tu określony zestaw środków technicznych, realizujących określone zadanie, według wybranej technologii, o określonej strukturze, w określonych warunkach. Kategorie konfiguracji zależą od wyróżniającego kryterium. Najczęściej wyróżnia się konfiguracje ze względu na:

- rozwiązania konstrukcyjne,
- rodzaj procesu termofizycznego,
- rodzaj suszonego materiału,
- rodzaj i postać produktu,
- rodzaj generatora ciepła,
- ciągłość procesu,
- mobilność systemu.

Oceny pracy różnych systemów bioagrosuszających można dokonać na podstawie wskaźników oceny efektywności. Wskaźniki te mogą być również wykorzystane do porównań różnych urządzeń.

## 1. Koncepcja budowy miar wskaźników efektywności

W celu budowy miar efektywności energetycznej systemu bioagrosuszającego przyjęto metodę budowy miar efektywności zaproponowaną przez Powierzę dla oceny efektywności eksploatacyjnej maszyn rolniczych [4, 5].

Niech przedmiotowy system suszący  $S$  będzie reprezentowany przez model  $M$  (1):

$$M = \langle O, R \rangle \quad (1)$$

w którym  $O$  (2) jest zbiorem elementów opisujących elementy systemu bioagrosuszającego  $S$ , a  $R$  (3) zbiorem relacji między elementami modelu  $M$ .

$$O = \{ O_k ; k = \overline{1, K} \} \quad (2)$$

$$R = \{ R_b ; b = \overline{1, B} \} \quad (3)$$

Ze zbioru  $R$  utworzono podzbiór  $RW \subset R$  będący zbiorem miar efektywności energetycznej systemu bioagrosuszającego. Ogólne miary efektywności

energetycznej  $W_{kl}$  systemu bioagrosuszącego zdefiniowano jako relacje pomiędzy elementami modelu  $S$  zgodnie z równaniem (4) [4].

$$W_{k,l} \stackrel{def}{=} \frac{O_k}{O_l} \quad ; \quad k, l = 1 \dots K \quad (4)$$

Miary zestawiono w macierzy kwadratowej (5)

$$W = [W_{k,l}]_{K \times K} = \begin{bmatrix} W_{1,1} & W_{1,2} & \dots & W_{1,K} \\ W_{2,1} & W_{2,2} & \dots & W_{2,K} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_{K,1} & W_{K,2} & \dots & W_{K,K} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Pomiędzy elementami  $[W_{k,l}]$  istnieją relacje określone zależnościami (6–8):

$$\forall k = l, k, l \in (\overline{1, K}): W_{k,l} = 1 \quad (6)$$

$$W_{k,b} \cdot W_{b,k} = W_{k,l} \quad ; \quad b = 1, \dots, K \quad (7)$$

$$\forall k \neq l \in (\overline{1, K}): W_{k,l} = \frac{1}{W_{l,k}} \quad (8)$$

Utworzono również  $K$  zbiorów wskaźników szczegółowych  $W_{k,l}^{i,j}$  z elementów wskaźników  $W_{k,l}$ , wskaźniki utworzono zgodnie z zależnością (9)

$$W_{k,l}^{i,j} \stackrel{def}{=} \frac{O_{ki}}{O_{lj}} \quad ; \quad k, l = 1 \dots K \quad ; \quad i, j = 1 \dots J \quad (9)$$

Wskaźniki zestawiono w  $K$  macierzy  $I \times J$  (10).

$$W = [W_{k,l}^{i,j}]_{K \times K} = \begin{bmatrix} W_{k,l}^{1,1} & W_{k,l}^{1,2} & \dots & W_{k,l}^{1,J} \\ W_{k,l}^{2,1} & W_{k,l}^{2,2} & \dots & W_{k,l}^{2,J} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_{k,l}^{I,1} & W_{k,l}^{I,2} & \dots & W_{k,l}^{I,J} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Pomiędzy elementami  $[W_{k,l}^{i,j}]$  istnieją relacje określone zależnościami (11–13):

$$\forall k, l \in (\overline{1, K}), \forall i, j \in (\overline{1, J}): W_{k,l}^{i,j} = \frac{1}{W_{l,k}^{j,i}} \quad (11)$$

$$\forall k = l, k, l \in (\overline{1, K}), \forall i = j, i, j \in (\overline{1, J}): W_{k,l}^{i,j} = 1 \quad (12)$$

$$W_{k,b}^{i,1} \cdot W_{b,l}^{1,j} = W_{k,l}^{i,j} ; b = 1, \dots, K, i, j = 1 \dots J \quad (13)$$

## 2. Wskaźniki efektywności energetycznej dla systemu bioagrosuszającego

Efekt użyteczny wykorzystania systemu może być zdefiniowany jako odparowanie określonego strumienia wody  $\Delta M$  z suszonego materiału. W celu uzyskania efektu użytecznego do systemu bioagrosuszającego doprowadzane są:

- energia chemiczna paliwa,
- energia doprowadzana z powietrzem suszącym (entalpia powietrza suszającego wprowadzanego do systemu),
- energia doprowadzana z materiałem suszonym (entalpia materiału suszonego wprowadzanego do systemu),
- energia elektryczna bezpośrednio wykorzystana do uzyskania efektu użytecznego (napęd wentylatorów),
- energia pochodząca z różnych źródeł pośrednio wykorzystana do uzyskania efektu użytecznego (oświetlenie, automatyka, ogrzewanie budynku suszarni).

W celu wyznaczenia wskaźników efektywności energetycznej w systemie wyodrębniono wpływające i wypływające strumienie materii i energii. Jako poziom odniesienia przyjęto stan powietrza zewnętrznego, ponieważ wartość temperatury powietrza suszającego należy podnieść od wartości temperatury otoczenia do wartości temperatury wymaganej przez proces suszenia, a ciepło usuwane do otoczenia może być wykorzystane tylko wtedy, jeśli wartość temperatury danego medium przekracza temperaturę otoczenia. W zbiorze obiektów modelowanego systemu zdefiniowano następujące podzbiory zmiennych procesowych (14–16) takie, że:  $M, G, E \subset MO$ :

$$M = \{M', M'', \Delta M\} \quad (14)$$

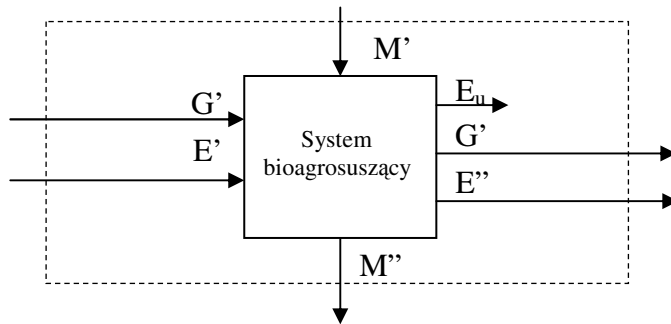
$$G = \{G', G''\} \quad (15)$$

$$E = \{E', E'', E_u\} \quad (16)$$

gdzie:

- M – podzbiór zmiennych opisujących masę suszonego materiału,
- M' – strumień wilgotnego materiału wprowadzanego do systemu,
- M'' – strumień wysuszonego materiału wyprowadzanego z systemu,
- $\Delta M$  – efekt użyteczny pracy suszarki. Jako efekt użyteczny przyjęto ilość wody odparowanej z materiału (17).
- G – podzbiór zmiennych opisujących masę powietrza suszącego,
- G' – strumień wilgotnego powietrza wprowadzanego do systemu,
- G'' – strumień wilgotnego powietrza wyprowadzanego z systemu,
- E – podzbiór zmiennych opisujących energię,
- E' – strumień energii doprowadzanej do systemu,
- E'' – strumień energii wyprowadzanej z systemu,
- $E_u$  – strumień energii użytecznej, wykorzystanej na otrzymanie produktu użytecznego.

$$\Delta M = M' - M'' = M_s u' - M_s u'' = M_s (u' - u'') = M_s \Delta u = G_s \Delta x = \Delta G \quad (17)$$



Rys. 1. Zestawienie strumieni przecinających osłonę bilansową systemu bioagrosuszającego

Zgodnie z równaniami (4, 5) utworzono macierz ogólnych miar efektywności (18). Po podstawieniu macierzy wskaźników szczegółowych do macierzy wskaźników ogólnych otrzymano macierz blokową wskaźników efektywności energetycznej (19).

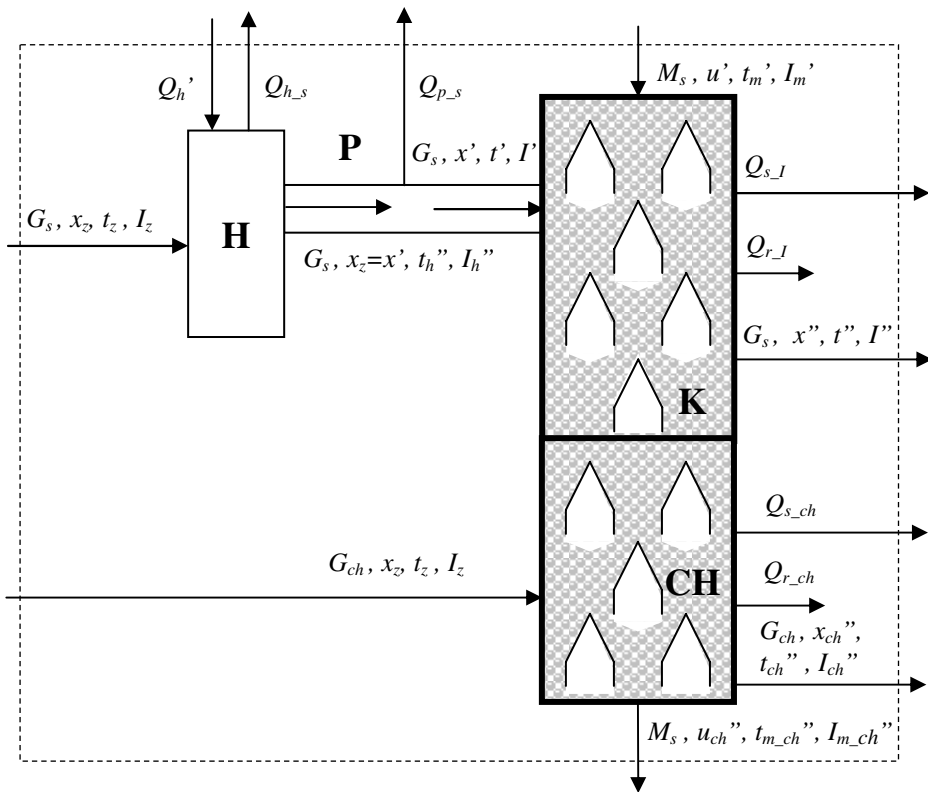
$$W = \begin{bmatrix} & M & G & E \\ M & \frac{M}{M} & \frac{M}{M} & \frac{M}{M} \\ & \frac{M}{G} & \frac{G}{G} & \frac{E}{G} \\ G & \frac{M}{G} & \frac{G}{G} & \frac{E}{G} \\ & \frac{M}{E} & \frac{G}{E} & \frac{E}{E} \\ E & \frac{M}{M} & \frac{G}{G} & \frac{E}{E} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$W = \begin{bmatrix} & & & & M & & & & G & & & & & & E & & & & \\ & & & & M' & M'' & \Delta M & & G' & G'' & & & & E' & E'' & E_u & & & & \\ & & & & & & & & & & & & & & & & & & & \\ M & M' & 1 & \frac{M'}{M''} & \frac{M'}{\Delta M} & \frac{M'}{M'} & \frac{M'}{M''} & \frac{M'}{\Delta M} & \frac{M'}{G'} & \frac{M'}{G''} & \frac{M'}{E'} & \frac{M'}{E''} & \frac{M'}{E_u} & & & & & & \\ & M'' & \frac{M''}{M'} & 1 & \frac{M''}{\Delta M} & \frac{M''}{M'} & \frac{M''}{M''} & \frac{M''}{\Delta M} & \frac{M''}{G'} & \frac{M''}{G''} & \frac{M''}{E'} & \frac{M''}{E''} & \frac{M''}{E_u} & & & & & & \\ & \Delta M & \frac{\Delta M}{M'} & \frac{\Delta M}{M''} & 1 & \frac{\Delta M}{\Delta M} & \frac{\Delta M}{\Delta M} & \frac{\Delta M}{\Delta M} & \frac{\Delta M}{G'} & \frac{\Delta M}{G''} & \frac{\Delta M}{E'} & \frac{\Delta M}{E''} & \frac{\Delta M}{E_u} & & & & & & \\ G & G' & \frac{G'}{M'} & \frac{G'}{M''} & \frac{G'}{\Delta M} & 1 & \frac{G'}{G''} & \frac{G'}{\Delta M} & \frac{G'}{G'} & \frac{G'}{G''} & \frac{G'}{E'} & \frac{G'}{E''} & \frac{G'}{E_u} & & & & & & \\ & G'' & \frac{G''}{M'} & \frac{G''}{M''} & \frac{G''}{\Delta M} & \frac{G''}{G'} & 1 & \frac{G''}{\Delta M} & \frac{G''}{G'} & \frac{G''}{G''} & \frac{G''}{E'} & \frac{G''}{E''} & \frac{G''}{E_u} & & & & & & \\ E & E' & \frac{E'}{M'} & \frac{E'}{M''} & \frac{E'}{\Delta M} & \frac{E'}{G'} & \frac{E'}{G''} & 1 & \frac{E'}{G'} & \frac{E'}{G''} & 1 & \frac{E'}{E''} & \frac{E'}{E_u} & & & & & & \\ & E'' & \frac{E''}{M'} & \frac{E''}{M''} & \frac{E''}{\Delta M} & \frac{E''}{G'} & \frac{E''}{G''} & \frac{E''}{E'} & \frac{E''}{G'} & \frac{E''}{G''} & \frac{E''}{E''} & 1 & \frac{E''}{E_u} & & & & & & \\ & E_u & \frac{E_u}{M'} & \frac{E_u}{M''} & \frac{E_u}{\Delta M} & \frac{E_u}{G'} & \frac{E_u}{G''} & \frac{E_u}{E'} & \frac{E_u}{G'} & \frac{E_u}{G''} & \frac{E_u}{E'} & \frac{E_u}{E''} & 1 & & & & & & \end{bmatrix} \quad (19)$$

### 3. Określenie wartości zmiennych procesowych do wyznaczenia wskaźników dla suszarki bez recyrkulacji

Wskaźniki efektywności energetycznej mogą być zastosowane, jeśli zostaną wyznaczone wartości zmiennych procesowych należących do podzbiorów M, G, oraz E. Wartości te określono dla suszarki daszkowej bez recyrkulacji powietrza suszącego przeznaczoną do suszenia ziarna. Suszarka wyposażona jest

w podgrzewacz powietrza, przewody powietrzne, kolumnę suszącą złożoną z komory suszącej oraz komory chłodzącej. Elementy te wydzielono z otoczenia za pomocą osłony kontrolnej (rys. 2). Powietrze pobierane z otoczenia podgrzewane jest w podgrzewaczu **H** do wymaganej temperatury i przewodami powietrznymi **P** przekazywane jest do komory suszącej **K**. Powietrze chłodzące pobierane jest bezpośrednio z otoczenia i zasysane do komory chłodzącej **CH**. Powietrze z obu komór odprowadzane jest do otoczenia. Materiał suszony przesypuje się przez komorę suszącą, a po wysuszeniu przez komorę chłodzącą. Zarówno w komorze suszącej jak i w komorze chłodzącej następuje odparowanie wody. Przez ścianki przewodów powietrznych oraz przez ścianki szybu suszącego następuje przenikanie ciepła do otoczenia.



Rys. 2. Graf wiązań suszarki bez recykulacji. Zestawienie strumieni przecinających osłonę bilansową

Strumień energii dostarczanej w przypadku suszarki bez recykulacji jest sumą strumienia energii dostarczanej z paliwem i materiałem suszonym oraz bezpośrednio wykorzystywanej energii elektrycznej (20). Strumień energii dostarczanej z paliwem określa się według zależności (21). Powiększenie zużycia energii o zużycie energii elektrycznej wydaje się celowe, w przypadku

kiedy w celu wysuszenia ziarna wystarczy powietrze w temperaturze otoczenia. W takim przypadku paliwo nie jest zużywane i niemożliwe jest obliczenie wartości wskaźników, między innymi sprawności energetycznej.

Straty energii podczas przekazywania ciepła od paliwa do powietrza można wyznaczyć na podstawie bilansu ciepła podgrzewacza powietrza (25) lub na podstawie wartości sprawności podgrzewacza podawanej przez producenta (26). Strumień energii użytecznej określany zgodnie z (22) jest sumą energii wykorzystanej na odparowanie wody w obu częściach suszarki (23). Strumień energii traconej (24) jest sumą ciepła traconego przez elementy obudowy suszarki (27, 29), ciepła unoszonego ze strumieniem powietrza suszącego (28, 30) oraz ciepła unoszonego z materiałem suszonym (31). Strumień materiału wprowadzanego do suszarki określa zależność (32), strumień materiału wyprowadzanego z suszarki zależność (33). Strumień powietrza wprowadzanego do suszarki określa zależność (34), strumień powietrza usuwanego z suszarki zależność (35).

$$E' = Q' + Q_m' + E_{el} \quad (20)$$

$$Q' = Q_i B \quad (21)$$

$$Q_r = M_s \Delta u r_p \quad (22)$$

$$Q_r = Q_{r_K} + Q_{r_{ch}} \quad (23)$$

$$E'' = Q_{h_s} + Q_{p_s} + Q_{s_l} + Q_{s_{ch}} + Q'' + Q_{ch}'' + Q_m'' \quad (24)$$

$$Q_{h_s} = Q' - G_s (c_p + x_z c_{pw}) (t' - t_z) \quad (25)$$

$$Q_{h_s} = (\eta + 1) Q' \quad (26)$$

$$Q_{h_p} = \int_{l=0}^{l=L} (F_p (k_p (t_G - t_z))) dl \quad (27)$$

$$Q_{ch}'' = G_{s_{ch}} (c_p + c_{pw} x_z) (t_{ch}'' - t_z) \quad (28)$$

$$Q_k = \int_{h=0}^{h=H} (F_k (k_k (t_G - t_z))) dh \quad (29)$$



$$Q'' = G_s (c_p + c_{pw} x) (t'' - t_z) \quad (30)$$

$$Q_m'' = M_s (c_m + c_w u) (t_m'' - t_z) \quad (31)$$

$$M' = M_s + M_w' = M_s (1 + u') \quad (32)$$

$$M'' = M_s + M_w'' = M_s (1 + u'') \quad (33)$$

$$G' = G_s + G_w' = G_s (1 + x') \quad (34)$$

$$G'' = G_s + G_w'' = G_s (1 + x'') \quad (35)$$

## Podsumowanie

W pracy zaproponowano zestaw wskaźników służących ocenie systemów bioagrosuszających. Na przykładzie suszarki daszkowej bez recyrkulacji przedstawiono sposób wyznaczania wartości zmiennych procesowych służących do określenia wskaźników. Przed przystąpieniem do wyznaczenia wskaźników oceny efektywności energetycznej systemu bioagrosuszającego konieczne jest wydzielenie systemu z otoczenia za pomocą osłony bilansowej. Natężenie przepływu materiału suszonego oraz powietrza suszącego na wejściu i na wyjściu z suszarki określane jest na podstawie założeń obliczeniowych dla suszarek nowo projektowanych lub na podstawie pomiarów wartości zmiennych procesowych podczas eksploatacji. Wartości wskaźników różnią się w zależności od warunków prowadzenia procesu, dlatego każdorazowo należy wyznaczyć na podstawie bilansu ciepła ich pożądane wartości. Na tej podstawie możliwe jest porównanie kilku systemów bioagrosuszających.

## Wykaz oznaczeń

### Oznaczenia

$\eta$  – sprawność podgrzewacza powietrza,  
 $B$  – ilość spalonego paliwa, kg/s,  
 $F$  – powierzchnia wymiany ciepła, m<sup>2</sup>,  
 $G$  – natężenie przepływu czynnika suszącego, kg/s,  
 $I$  – entalpia, J,  
 $k$  – współczynnik przenikania ciepła, W/m<sup>2</sup>K,

$M$  – natężenie przepływu materiału suszonego, kg/s,  
 $q$  – ciepło w odniesieniu do 1 kg wilgoci, J/kg,  
 $Q$  – ciepło, J,  
 $Q_r$  – wartość opałowa paliwa, J/kg,  
 $r$  – ciepło parowania wody, J/kg odparowanej wody,  
 $t$  – temperatura materiału suszonego, °C,

$u$  – zawartość wody w materiale suszonym, kg wody/kg suchej masy materiału,

$x$  – zawartość wody w czynniku suszącym, kg wody/kg suchego powietrza,

#### *Indeksy*

‘ – wejście,

” – wyjście,

$el$  – energia elektryczna,

$G$  – powietrze suszące,

$h$  – podgrzewacz,

$k$  – kolumna susząca,

$m$  – materiał suszony,

$p$  – powietrze, przewody powietrzne,

$pw$  – para wodna,

$s$  – sucha masa, straty, komora susząca,

$W$  – woda,

$I$  – część susząca kolumny suszącej,

$II$  – część chłodząca kolumny suszącej.

## **Bibliografia**

1. Kudra T.: Energy aspects in drying. *Drying Technology*. 2004. Vol. 22 No. 5. s. 917–932, Marcel Dekker Inc. [www.dekker.com](http://www.dekker.com)
2. Mujumdar A.S.: Mujumdar's practical guide to industrial drying principles equipment and new developments. Exergex Corp., Quebec 2000.
3. Mujumdar A.S., Suvachittanont S.: Developments in drying. Food dehydration. Kasetsart University Press, Thailand 2000.
4. Powierża L.: Efektywność eksploatacyjna maszyn rolniczych. Rozprawa habilitacyjna. IBMER, Warszawa 1981.
5. Powierża L.: Zarys inżynierii systemów bioagrotechnicznych. Biblioteka Problemów Eksploatacji. Wyd. ITeE, Radom–Płock 1997.

Recenzent:

**Leszek POWIERŻA**

## **Definition of energy efficiency indexes of bioagridrying systems**

### **Summary**

In the paper the formulation rules of energy efficiency indexes for drying systems were presented. Energy efficiency indexes were defined. The principles of deriving process variables necessary for indexes calculation were presented using the example of continuous flow tower grain dryer.