

MODEL MATEMATYCZNY WALCOWEJ KOMORY PIROLITYCZNEJ

KRZYSZTOF WACŁAWIAK, JAN NADZIAKIEWICZ

Katedra Technologii i Urządzeń Zagospodarowania Odpadów
Politechnika Śląska, ul. Konarskiego 18, 44-101 Gliwice

Keywords: pyrolysis, cylindrical pyrolysing chamber, waste material.

MATHEMATICAL MODEL OF THE CYLINDRICAL PYROLYSING CHAMBER

Pyrolysis is often a first step in the incineration process, especially of the hazardous waste. One of examples of such installation is presented in the paper cylindrical pyrolysis chamber, applied in the incineration plant for medical waste. In the chamber the carbonisation of the waste takes place and the products, such as volatiles and carbonisate are burned in the cylindrical combustion chamber surrounding the pyrolysis chamber. Such configuration provides the heat transport from the flue gases to the carbonising material. To model the processes taking place in the pyrolysis chamber the energy and mass balance equations have been defined. The system of equations was solved for the exemplary material, such as wood sawdust, of a known thermophysical properties. Results are presented as diagrams of various parameters inside the two-dimension domain of the chamber.

Streszczenie

Proces pirolizy jest często wstępnym etapem spalania odpadów, szczególnie niebezpiecznych. Przykładem takiego układu jest walcowa komora pirolityczna, wykorzystywana jako element niektórych instalacji do spalania odpadów medycznych. W tej komorze zachodzi proces odgazowania odpadów, a produkty w postaci gazów pirolitycznych i karbonizatu są spalane w cylindrycznej komorze otaczającej komorę pirolityczną. Jej położenie wewnątrz komory spalania zapewnia pośredni dopływ ciepła przez pobocznice walca. Natomiast wsad przesuwany pionowo w dół w kierunku rusztu. W celu modelowania procesów zachodzących w takiej komorze sporządzono bilanse masy i energii w stanie ustalonym pracy komory. Układy równań bilansów masy i energii rozwiązano dla przykładowych odpadów (trocin drzewnych), dla których laboratoryjnie wyznaczono właściwości termofizyczne, takie jak stosunek odgazowania i ciepło spalania produktów odgazowania. Wyniki przedstawiono w postaci wykresów zmienności parametrów procesu w dwuwymiarowej przestrzeni komory.

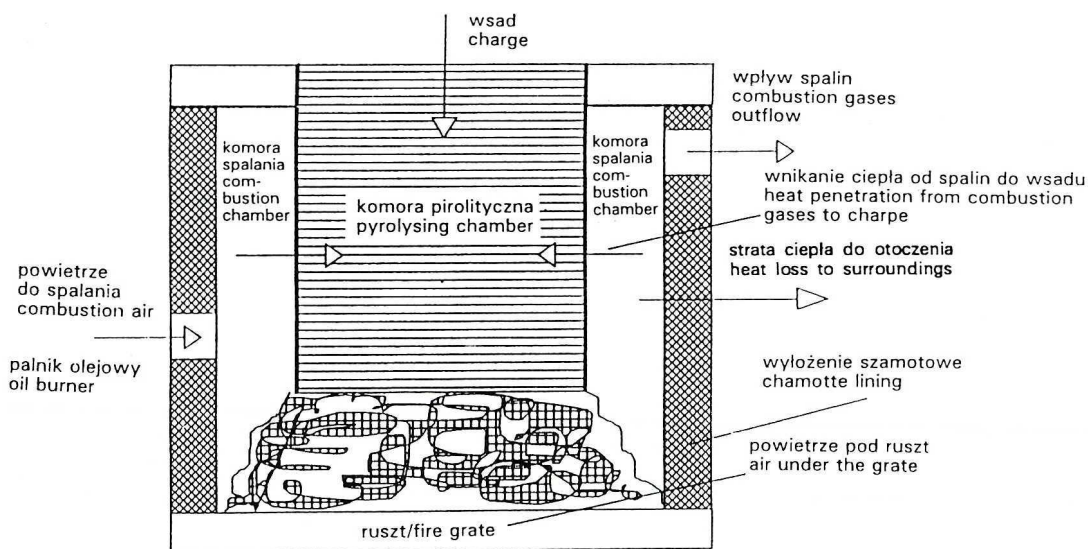
WSTĘP

Spalanie odpadów w dwuetapowym procesie składającym się z pirolizy i następnie spalania jej produktów stałych i gazowych jest często stosowane, szczególnie w przypadku odpadów specjalnych, takich jak odpady niebezpieczne, medyczne itp. Proces taki jest realizowany w dwóch komorach – komorze pirolitycznej, w której zachodzi rozkład termiczny substancji, oraz w komorze spalania, do której doprowadzane jest powietrze z nadmiarem zależnym od ilości i składu produktów pirolizy. Taki sposób postępowania pozwala na lepszą organizację procesów i zapobiega powstawaniu lokalnie warunków niekontrolowanego spalania. Przykładem takiego układu jest opisana poniżej komora pirolityczna ogrzewana spalinami ze spalania produktów odgazowania, stosowana w instalacji spalania odpadów szpitalnych [1].

OGÓLNY OPIS PROCESÓW ZACHODZĄCYCH W KOMORZE PIROLITYCZNEJ

Modelowany reaktor można opisać jako komorę pirolityczną zanurzoną w komorze spalania, co przedstawiono na poniższym rysunku (rys. 1).

Odpady ładowane są od góry, do rury odgazowawcza, umieszczonej w komorze spalania. Z rury odgazowawcza wychodzą produkty w postaci stałej, spalane dalej na ruszcie oraz w postaci gazowej spalające się w komorze spalania.



Rys. 1. Schemat komory reaktora spalania odpadów poszpitalnych
Scheme of the incineration reactor for medical waste

Proces odgazowania zachodzący we wnętrzu modelowanego reaktora jest bardzo skomplikowany, dlatego w modelu został on opisany całkowitymi bilansami masy i energii.

Substancja stała podlegająca rozkładowi daje w wyniku podgrzewania substancję lotną i pozostałość stałą – zwaną koksem w przypadku węgla lub karbonizatem, pirolizatem w przypadkach odgazowania innych substancji niż węgiel. Przebieg procesu odgazowania jest zależny od dwóch głównych czynników: temperatury substancji i czasu jej ogrzewania. Ilość powstającej substancji lotnej, temperatura przemiany oraz ilość doprowadzonego ciepła są powiązane wzajemnie równaniami bilansu masy, energii i kinetyki przemiany.

Jako stan odniesienia dla bilansu przyjęto początkową masę suchej substancji stałej podlegającej rozkładowi – $m_{s,o}$. Powyżej temperatury początku odgazowania T_o substancja stała sucha m_o ulega rozkładowi, a bilans masy tej przemiany wyraża się zależnością:

$$m_l(\tau) = m_{s,o} - m_s(\tau). \quad (1)$$

Przyjęto przy tym, że substancja mineralna – popiół nie ulega rozkładowi. Ilościowo proces odgazowania jest opisany przez stosunek odgazowania z:

$$z_T = \frac{m_l}{m_{s,o}} = 1 - \frac{m_s}{m_{s,o}}. \quad (2)$$

Szczególnie ważny jest stan graniczny przemian odgazowania zwany zupełnym. Jest to stan, jaki osiągnie się po dostatecznie długim czasie przebywania substancji w danej temperaturze. W tym przypadku z wyraża się jako z_T i jest zwana stosunkiem odgazowania zupełnego [2].

Funkcja odgazowania zupełnego $m_{l,T} = m_{l,T}(T)$ wyznaczana jest eksperymentalnie dla danej substancji odgazowującej.

OPIS MATEMATYCZNY PROCESU PIROLIZY

PRZYJĘTE ZAŁOŻENIA MODELOWE

W modelu obliczeniowym [7] przyjęto następujące założenia:

1. Substancja wsadowa jest obliczeniowo dzielona na części: palną (podlegającą rozkładowi), mineralną (popiół), lotną i wilgoć.
2. Spalanie wsadu następuje w komorze spalania poza komorą pirolityczną, ulegają mu części lotne powstałe w wyniku odgazowania oraz substancja stała (karbonizat).
3. Przyjęto, że rozkładowi podlega tylko substancja palna (nie uwzględnia się popiołu), stąd ubytek substancji palnej odpowiada przyrostowi substancji lotnej.
4. Czas przebywania wsadu w komorze pirolitycznej jest wystarczająco długi, aby uzyskać odgazowanie zupełne karbonizatu w danej temperaturze. Po-

zwala to na pominięcie kinetyki odgazowania i określenie ilości części lotnych na drodze laboratoryjnej. Czas przebywania wsadu w komorze pirolitycznej wynosi kilkadziesiąt minut i jest dostatecznie długi dla osiągnięcia odgazowania zupełnego.

5. Przyjęto zmienność parametrów części lotnych i fazy stałej wzdłuż osi i promienia reaktora (model dwuwymiarowy).
6. Części stałe: karbonizat i popiół mają tę samą temperaturę; podobnie części lotne: gazy powstałe z odgazowania i wilgoć – w danym elemencie różnicowym.
7. Ciepło do komory dopływa przez jej pobocznice, uwzględniono przy tym promieniowanie gazów i ścian komory spalania oraz konwekcję od gazów spalinowych.
8. Wielkość ziaren materiału wsadowego nie ulega zmianie podczas pirolizy.

BILANS MASY PROCESU ODGAZOWANIA

Założono, że ruch wsadu odbywa się w dół wzdłuż rury reaktora pirolitycznego. Natomiast szczególnie trudny do przewidzenia jest rozptyw substancji lotnej w masie wsadu ponieważ generowana jest ona głównie w pobliżu ścianek komory i dopiero stamtąd się rozptywa. Faza lotna pochodzi z dwóch źródeł. Jednym źródłem jest wilgoć zawarta we wsadzie odparowująca przy podgrzewaniu. Jako drugie, po osiągnięciu temperatury początku odgazowania T_0 zaczynają się wydzielać substancje lotne i trwa to aż do temperatury końca odgazowania.

Złoże usypane jako materiał porowaty charakteryzowane jest przez opory przepływu zależne od porowatości złoża ε , średnicy ziaren d i liczby Reynoldsa Re .

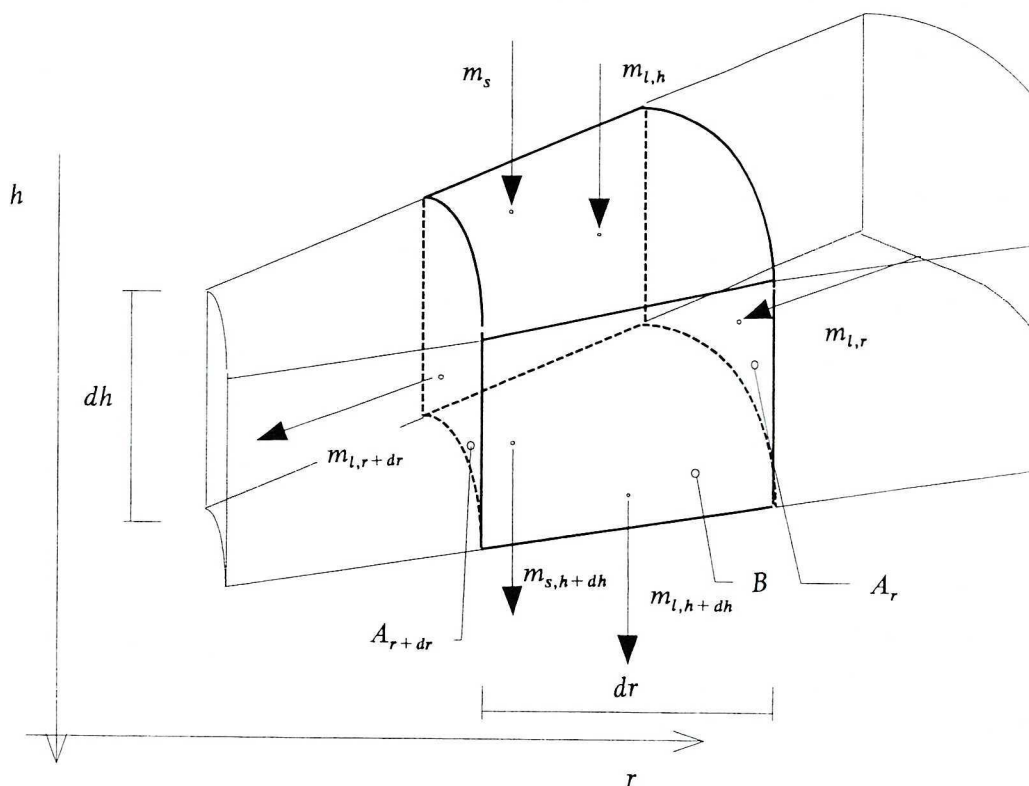
Walcowa komora pirolityczna została podzielona na elementarne pierścienie o stałych wysokościach dh i szerokościach dr . Schemat rozptywu substancji lotnej przedstawiono na rys. 2. Bilans masy strumieni substancji lotnej będzie wyglądał następująco:

$$dm_l = -dm_s, \quad (3)$$

$$dm_l = dm_{l,h} + dm_{l,r}, \quad (4)$$

$$dm_l = \frac{\partial z_{T_s}}{\partial T_s} \frac{\partial T_s}{\partial h} m_{s,o} dh. \quad (5)$$

Równanie (3) ujmuje podstawowe założenie, że przyrost masy substancji lotnej jest równy ubytkowi masy substancji stałej (przyjęcie inertności substancji mineralnej – popiołu). Drugie równanie (4) uwzględnia rozptyw substancji lotnej w kierunkach osiowym i promieniowym.



Rys. 2. Schemat przepływu strumieni substancji dla pierścienia elementarnego
 Scheme of the mass flow in the elementary annulus of the chamber

PRZEPIY W SUBSTANCJI LOTNEJ

Rozpiy w substancji lotnej uwarunkowany jest rozkadem cišnienia $P(h, r)$ wewnàtrz wsadu. Rozkade temperatury elementów komory okrešla iloŝci powstajàcej substancji lotnej, to zaŝ pozwala na rozwiàzanie pola przepiywu. Zakłada siê przy tym, że złoże usypane wsadu w komorze pirolitycznej jest materiałem porowatym, o znanej porowatoŝci ϵ , i efektywnej ŝrednicy ziarna d_w . Liczba Re jest w przypadku odgazowania niewysoka [2, 3], poniewaŝ brak zewnêtrznego strumienia gazu. W tym przypadku spadek cišnienia oblicza siê wg wzoru Darcy'ego:

$$\frac{dp}{dx} = \lambda_p \frac{w^2 \rho}{2 d_w}, \quad (6)$$

gdzie liczba tarcia λ_p okrešlana jest dla kanału równowaŝnego o ŝrednicy d_a w formie kryterialnej $\lambda_p = f[(Re)_p]$.

Przestrzenny rozptyw gazu opisany jest równaniem różniczkowym Poissona o następującej postaci:

$$\nabla^2 P + \frac{g_v}{\varphi_p} = 0, \quad (7)$$

gdzie φ_p jest współczynnikiem oporów przepływu przez złożę usypane [3].

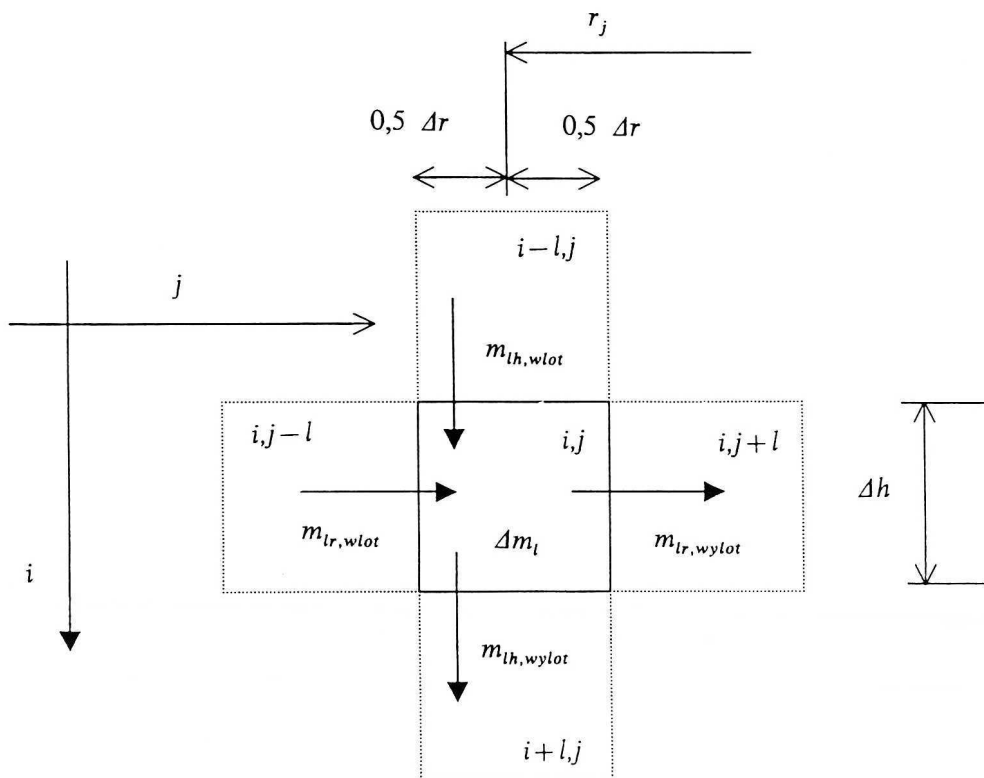
Warunki brzegowe w tym przypadku są następujące:

$$\left. \frac{\partial P(h, r)}{\partial r} \right|_{r=R, r=0} = 0, \quad (8a)$$

$$\left. \frac{\partial P(h, r)}{\partial h} \right|_{h=0} = 0, \quad (8b)$$

$$P(h, r)|_{h=H} = 0. \quad (8c)$$

Na rys. 3 przedstawiono elementarny pierścień wraz z zaznaczonymi strumieniami substancji lotnej: osiowymi i promieniowymi; kierunki przepływu dobrano intuicyjnie, jednakże nie mają one wpływu na prawidłowość rozwiązania.



Rys. 3. Schemat bilansowy rozptywu substancji lotnej
Volatile matter flow in the elementary annulus

Równania opisujące strumienie substancji lotnej przepływające między elementami pierścieniowymi mają następującą postać (podano przykładowe strumienie):

- strumień wlotowy osiowy:

$$m_{l,h,wlot} = \frac{\varphi_p}{\Delta h} r_j \Delta r (P_{i-1,j} - P_{i,j}), \quad (9)$$

- strumień wlotowy promieniowy:

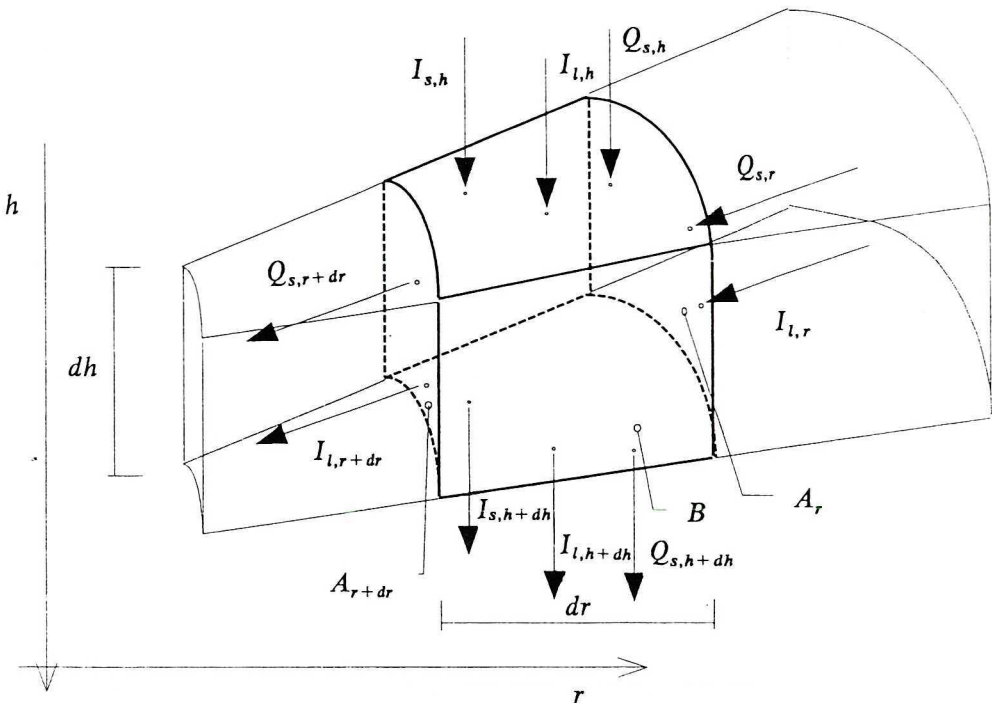
$$m_{l,r,wlot} = \frac{\varphi_p}{\Delta r} (r_j + \frac{1}{2} \Delta r) 2\pi \Delta h (P_{i,j-1} - P_{i,j}), \quad (10)$$

- wydajność źródła substancji lotnej w elemencie „i, j”:

$$g_{v,i,j} = \frac{\Delta m_{l,i,j}}{V_{i,j}} = \frac{(z_{i,j} - z_{i-1,j}) m_{s,o,j}}{r_j 2\pi \Delta r \Delta h}. \quad (11)$$

Bilans substancji lotnej dla elementarnego pierścienia:

$$m_{l,h,wlot} + m_{l,r,wlot} + g_{v,i,j} V_{i,j} = m_{l,h,wylot} + m_{l,r,wylot}. \quad (12)$$



Rys. 4. Schemat przepływu strumieni energii dla pierścienia elementarnego
Energy flow in the elementary annulus

Macierzowa postać tego równania jest następująca:

$$[A][P] = [B], \quad (13)$$

gdzie macierz $[A]$ jest macierzą współczynników przy wyrazach $P_{i,j}$, a macierz $[B]$ macierzą wyrazów wolnych – źródeł substancji lotnej.

Rozwiązaniem powyższego układu równań uzupełnionego o warunki brzegowe jest tablica wartości nadciśnień $P_{i,j}$. Znając te wartości, z równań 9–11 wyznacza się strumienie substancji lotnej co do wartości oraz kierunku przepływu (dodatnie wartości – zgodnie z przyjętym kierunkiem – rys. 4; ujemne wartości – przeciwnie do przyjętych kierunków).

BILANS ENERGII PROCESU ODGAZOWANIA

Dla sporządzenia bilansu energii konieczna jest znajomość strumieni substancji, otrzymanych z bilansu substancji. Pozwalają one na określenie strumieni entalpii czynników biorących udział w procesie odgazowania.

Przy określaniu entalpii fizycznej części lotnych, wilgoci, popiołu i karbonizatu przyjęto stałą wartość ciepła właściwego c_p , określoną na podstawie literatury [4]. Wobec powyższego entalpie poszczególnych składników są określane następująco:

$$I_s = m_s(T_s)[c_{ps}(T_s - T_n) + i_{ch,s}], \quad (14a)$$

$$I_p = m_p[c_{pp}(T_p - T_n) + i_{ch,p}], \quad (14b)$$

$$I_w = m_w[c_{pw}(T_w - T_n) + i_{ch,w}], \quad (14c)$$

$$I_l = m_l(T_l)[c_{pl}(T_l - T_n) + i_{ch,l}]. \quad (14d)$$

Jako temperaturę odniesienia przyjęto $T_n = 298 \text{ K}$ (25°C). Entalpia właściwa chemiczna substancji stałej $i_{ch,s}(T_s)$ i lotnej $i_{ch,l}(T_l)$ uwzględniana jest jako entalpia spalania wg zależności doświadczalnych. Entalpia chemiczna popiołu $i_{ch,p}(T_s)$ wynosi 0. Entalpia chemiczna wody (pary wodnej) przyjmowana jest jako entalpia spalania, a więc dla wody ciekłej wynosi 0, a dla pary wodnej równa się entalpii parowania $+r_n$.

Zgodnie z przyjętym założeniem temperatury substancji stałej T_s i popiołu T_p są sobie równe, podobnie substancji lotnej T_l i wilgoci (pary wodnej) T_w .

Strumień masy przenosi energię w postaci entalpii fizycznej oraz chemicznej. Ciepło przekazywane jest zaś na drodze przewodzenia pomiędzy sąsiednimi przesuwanymi się warstwami (współczynnik przewodnictwa cieplnego jest przyjmowany z wartości tablicowych [5] dla złoża usypanego). Schemat przepływu strumieni energii przedstawiono na rys. 4.

Występujące w równaniach 14 strumienie karbonizatu m_s i lotnych m_l wyznacza się na podstawie rozwiązania pola ciśnień z bilansu masy: równania 3, 4 i 5.

SUSZENIE I PODGRZEWANIE WSADU

Podobnie jak dla procesu odgazowania również dla procesu suszenia założono, że wilgotność materiału zależy tylko od temperatury. Początkowa wilgotność wsadu w temperaturze $T_{ot} = 0^{\circ}\text{C}$ wynosi w_0 , a w temperaturze końca suszenia $T_{ks} = 105^{\circ}\text{C}$ cała wilgoć ulega odparowaniu ($w = 0$). Przyjęto, że między tymi wartościami zmiana wilgotności $w = w(T)$ jest liniowa:

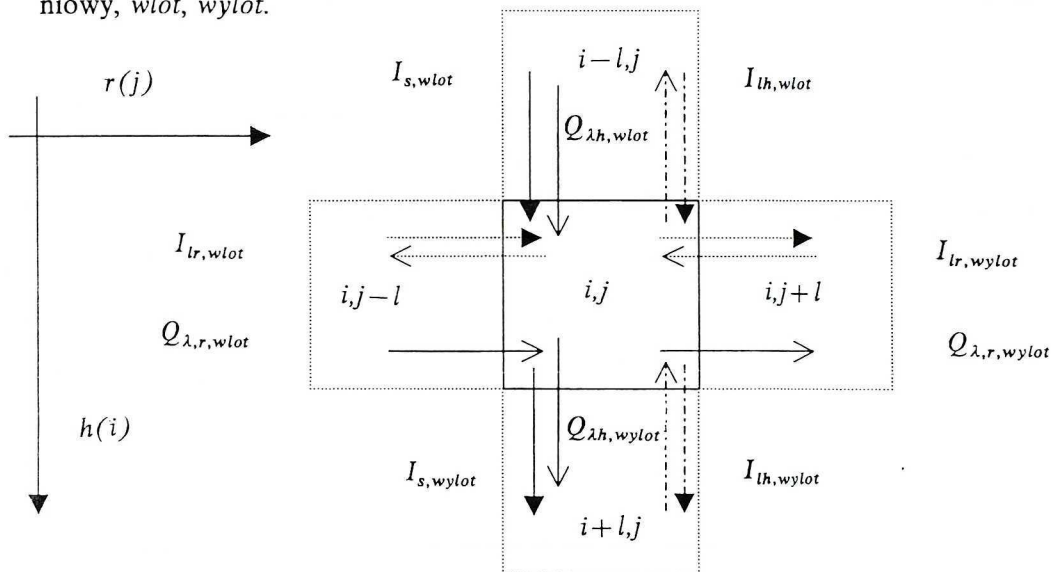
$$w = w_0 \left(1 - \frac{T - T_{ot}}{T_{ks} - T_{ot}} \right) \tag{15}$$

Wilgoć przechodząca w postać pary, uwzględniana jest w strumieniu substancji lotnych.

Podgrzewanie substancji stałej, suchej odbywa się aż do osiągnięcia przez nią temperatury początku odgazowania T_o . Uwzględnia się przy tym jedynie zmianę entalpii fizycznej suchego wsadu, ponieważ jego skład chemiczny nie ulega zmianie.

BILANS PROCESU ODGAZOWANIA WSADU

Przy podgrzewaniu substancji powyżej temperatury początku odgazowania następuje uwolnienie substancji lotnej w ilości zależnej od temperatury. Substancja lotna rozpyla się w porowatym wsadzie zależnie od rozkładu ciśnienia. Na rys. 5 przedstawiono składniki bilansu energii dla elementu „ i, j ” z zaznaczeniem alternatywnych kierunków przepływu substancji lotnych; aby zwiększyć przejrzystość rysunku substancje zaznaczono jedynie ogólnie symbolami s – substancja stała, l – lotna, oraz kierunki: h – osiowy, r – promieniowy, $wlot$, $wylot$.



Rys. 5. Bilans energii elementu „ i, j ”
Energy balance for the element “ i, j ”

Przy obliczaniu entalpii przyjęto, że wypływający z danego elementu różnicowego strumień substancji ma temperaturę tego elementu, tzn. wszystkie substancje: karbonizat i części lotne mają jednakową temperaturę po wyjściu z elementu różnicowego.

Następujące zależności opisują składowe bilansu masy i energii dla elementu „ i, j ” (podano przykładowe strumienie, aby uprościć zapis pominięto popiół).

– strumień wlotowy substancji stałej:

$$m_{s,wlot} = (1 - z_{i-1,j})m_{s,o,j}, \quad (16)$$

– entalpia strumienia wlotowego substancji stałej:

$$I_{s,wlot} = m_{s,wlot} \{c_{p,s}(T_{i-1,j} - T_n) + i_{ch,s,i-1,j}\}, \quad (17)$$

– entalpia osiowego strumienia wlotowego substancji lotnej, gdy $p_{i-1,j} > p_{i,j}$:

$$I_{l,h,wlot} = m_{l,h,wlot} \{c_{p,l}(T_{i-1,j} - T_n) + i_{ch,l,i-1}\}, \quad (18a)$$

gdy $p_{i-1,j} > p_{i,j}$:

$$I_{l,h,wlot} = m_{l,h,wlot} \{c_{p,l}(T_{i,j} - T_n) + i_{ch,l,i,j}\}, \quad (18b)$$

– entalpia promieniowego strumienia wlotowego substancji lotnej, gdy $p_{i,j-1} > p_{i,j}$:

$$I_{l,r,wlot} = m_{l,r,wlot} \{c_{p,i}(T_{i,j-1,j} - T_n) + i_{ch,l,i,j-1}\}, \quad (19a)$$

gdy $p_{i,j-1} < p_{i,j}$:

$$I_{l,r,wlot} = m_{l,r,wlot} \{c_{p,i}(T_{i,j} - T_n) + i_{ch,l,i,j}\}, \quad (19b)$$

– strumień ciepła dopływający do elementu „ i, j ” przez przewodzenie z elementu „ $i, j-1$ ”:

$$Q_{\lambda,r,wlot} = \frac{\lambda}{\Delta r} (r_j + \frac{1}{2}\Delta r) 2\pi \Delta h (T_{i,j-1,j} - T_{i,j}). \quad (20)$$

Bilans energii danego elementu „ i, j ” wygląda następująco (poszczególne entalpie pisane są dla kierunków pokazanych na rys. 6 z zaczernionymi gro-tami):

$$\begin{aligned} & I_{s,wlot} + I_{l,h,wlot} + I_{l,r,wlot} + Q_{\lambda,r,wlot} + Q_{\lambda,h,wlot} = \\ & = I_{s,wylot} + I_{l,h,wylot} + I_{l,r,wylot} + Q_{\lambda,r,wylot} + Q_{\lambda,h,wylot}. \end{aligned} \quad (21)$$

Równania te tworzą układ równań macierzowych, w których niewiadomy-mi są wartości temperatury wsadu i substancji lotnej w elementach wsadu $T_{i,j}$. Prawe strony równań przedstawiają dodatnie lub ujemne źródła energii w zale-żności od typu przebiegu procesu: endotermiczny lub egzotermiczny.

$$[C][T] = [D]. \quad (22)$$

Powyższe równania muszą być uzupełnione o warunki brzegowe. Warunki te są następujące:

1. w osi komory warunek brzegowy II rodzaju (symetria osiowa), warunek Neumanna:

$$\left. \frac{\partial T(h, r)}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad (23a)$$

2. na powierzchni zewnętrznej ściany reaktora warunek brzegowy III rodzaju, warunek Fouriera:

$$-\lambda_{scr} \left. \frac{\partial T_{sc}(h, r)}{\partial r} \right|_{r=R_r+g_{scr}} = \alpha_w(T_{sp} - T_{sc}), \quad (23b)$$

3. na granicy ściany i wsadu warunek brzegowy IV rodzaju:

$$\begin{aligned} \lambda_{scr} \left. \frac{\partial T_{sc}(h, r)}{\partial r} \right|_{r=R_r} &= \lambda \left. \frac{\partial T(h, r)}{\partial r} \right|_{r=R_r} \\ \Rightarrow T_{sc}|_{r=R_r} &= T|_{r=R_r}. \end{aligned} \quad (23c)$$

Równanie macierzowe (22) uzupełnione o warunki brzegowe (23a–c) rozwiązywane jest metodą Gaussa.

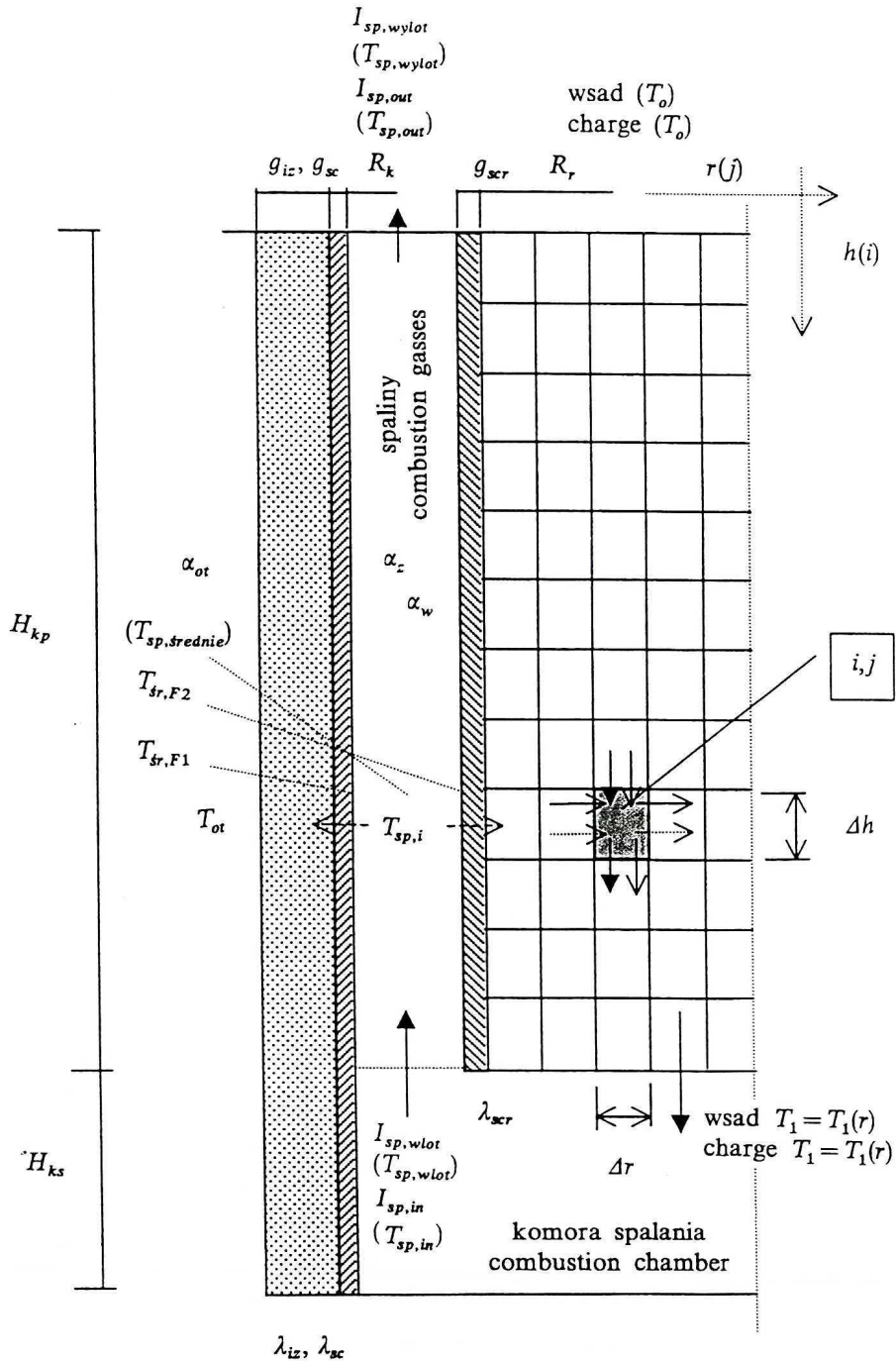
Schemat układu reaktora (komory pirolitycznej) wraz z komorą spalania i komorą gazów spalinowych przedstawiono na rys. 6.

W obliczeniach modelowych występują entalpie chemiczne substancji lotnych przepływających przez dany element, a nie tylko powstających podczas odgazowania. Stąd uwzględniono mieszanie przepływających substancji lotnych. Do danego elementu dopływa dodatkowo substancja lotna z sąsiednich elementów (osiowo i promieniowo), oraz po zmieszaniu wypływa w kierunkach osiowym i promieniowym. Stąd w równaniach bilansu energii (21) jednolite oznaczenie entalpii części lotnych wypływających z danego pierścienia – $i_{chl, wylot}$.

WŁAŚCIWOŚCI FAZ STAŁEJ I GAZOWEJ

Substancja stała będąca w początkowej fazie procesu wsadem – substancją surową, ulega ciągłej przemianie odgazowania polegającej w skrócie na uwęglaniu, tj. wzroście udziału pierwiastka węgla w substancji stałej. Końcowym produktem stałym procesu jest substancja o blisko 100% udziale węgla – licząc dla stanu (daf) suchego, bezpopiołowego (dla temperatury końca odgazowania, np. dla węgla kamiennego przyjmuje się $T = 1500 \text{ K}$ [2]). W niższych temperaturach udział węgla będzie oczywiście mniejszy. Substancja stała w trakcie odgazowania zmienia swe własności fizykochemiczne: ciepło właściwe, wartość opałową (entalpia spalania), współczynnik przewodnictwa ciepła. Ważna jest też zmiana objętości ziaren: kształtu, wymiarów, decyduje ona o porowatości złoża.

Ilość odgazowanej substancji lotnej oraz jej skład chemiczny i entalpia spalania w danej temperaturze są zmienne i są określane doświadczalnie [6].



Rys. 6. Schemat układu komory pirolizacyjnej wraz z otaczającymi komorami spalania karbonizatu i kanałem gazów spalinowych

Scheme of the pyrolysis chamber and surrounding combustion chamber for carbonisate and pyrolysis gases

PROGRAM OBLICZENIOWY

OPIS ALGORYTMU OBLICZENIOWEGO

Program obliczeniowy opisujący procesy zachodzące w odgazowywaczu napisany został w języku Borland Pascal 7.0. Prócz głównych procedur obliczania odgazowania komory pirolitycznej w programie występują inne procedury określające:

- temperaturę spalin w komorze spalania,
- współczynniki wnikania ciepła od spalin oraz od ściany komory spalania do rury reaktora,
- stosunki odgazowania zupełnego dla dowolnych temperatur przemiany,
- zmiany entalpii spalania karbonizatu, substancji lotnych.

Początek programu zawiera wprowadzenie właściwości wsadu, tj. składu elementarnego, entalpii spalania, zawartości substancji lotnych oraz gęstości, jak również charakterystyki odgazowania: ilość i skład substancji lotnej w funkcji temperatury. Komora spalania opisywana jest także przez współczynnik nadmiaru powietrza, jego temperaturę, zawilgocenie, swą geometrię i grubość ścianki izolacji szamotowej. Wpierw obliczana jest temperatura komory spalania z bilansu energii oraz z równań stechiometrycznych oraz temperatura spalin na wylocie z kanału spalinowego (kanał wzdłuż ścianki komory pirolitycznej), później korzystając z tych temperatur zakłada się średnią temperaturę ścianki rury komory pirolitycznej, co umożliwia obliczenie współczynników radiacyjnych wnikania ciepła od spalin i ściany komory spalania do rury reaktora. Teraz dokonuje się podziału rury reaktora na elementarne pierścienie odgazowujące. Następuje przyjęcie startowego pola temperatur wsadu i zostają rozwiązane układy równań bilansu masy i energii.

Rozwiązanie ostateczne jest otrzymywane na drodze iteracji pól temperatury i właściwości wsadu.

PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

Obliczenia modelowe wykonano dla odpadów drzewnych – trocin tartacznych, ze względu na posiadanie dosyć obszernych danych materiałowych i charakterystyk odgazowania. Przykładowo przyjęto geometrię komory pirolitycznej i wydajność procesu.

Dane przyjęte do obliczeń

W obliczeniach przyjmowano wartość entalpii chemicznej (entalpii spalania) określoną na drodze laboratoryjnej i zakładano jako zmienną w procesie [6]. Inne właściwości były przyjęte z literatury jako stałe, tj. ciepło właściwe $c_{p,s}$, współczynnik przewodzenia ciepła λ_t .

Główne dane trocin przyjęte w obliczeniach przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Właściwości trocin przyjęte do obliczeń [7]
 Properties of the sawdust for the calculations [7]

Właściwość Property	Jednostka Unit	Wartość Value
Analiza elementarna Elementary analysis	% masowe	
C		43,03
H		6,70
N		1,58
O		39,20
S		0,07
Wilgoć Moisture		9,06
Popiół Ash		0,36
Entalpia spalania Incinesation enthalpy	MJ/kg (daf)	19
Ciepło właściwe Specific heat	kJ/(kgK)	2,3
Przewodność cieplna Thermal conductivity	W/(mK)	0,1
Wielkość ziarna Grain size	mm	2
Porowatość złoża Deposit porosity	—	0,2
Współczynnik przepływu substancji w złożu ϕ_p Deposit matter flow index	s	$2,5 \cdot 10^{-5}$

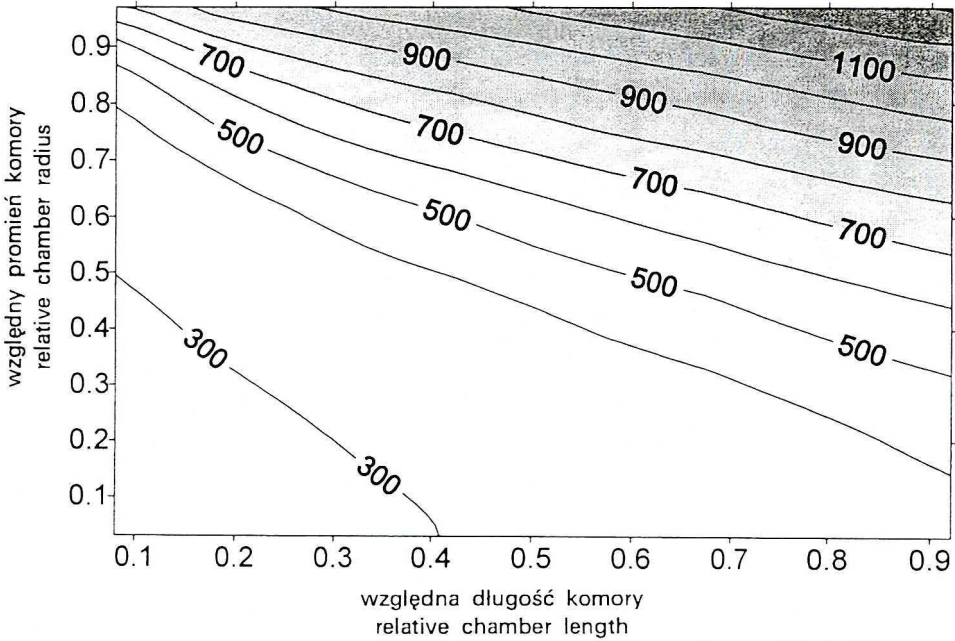
Przykładowe wyniki obliczeń

Wyniki są prezentowane na wykresach przestrzennych, gdzie osiami poziomymi są względne długość (wlot komory: 0, wylot 1) i promień komory pirolitycznej. Wydajność spalania dobrano niską – 1 kg/h, a średnicę komory małą $d_w = 0,1$ m oraz długość $l = 1$ m, aby zapewnić długi czas przebywania w komorze, a co za tym idzie dobre odgazowanie.

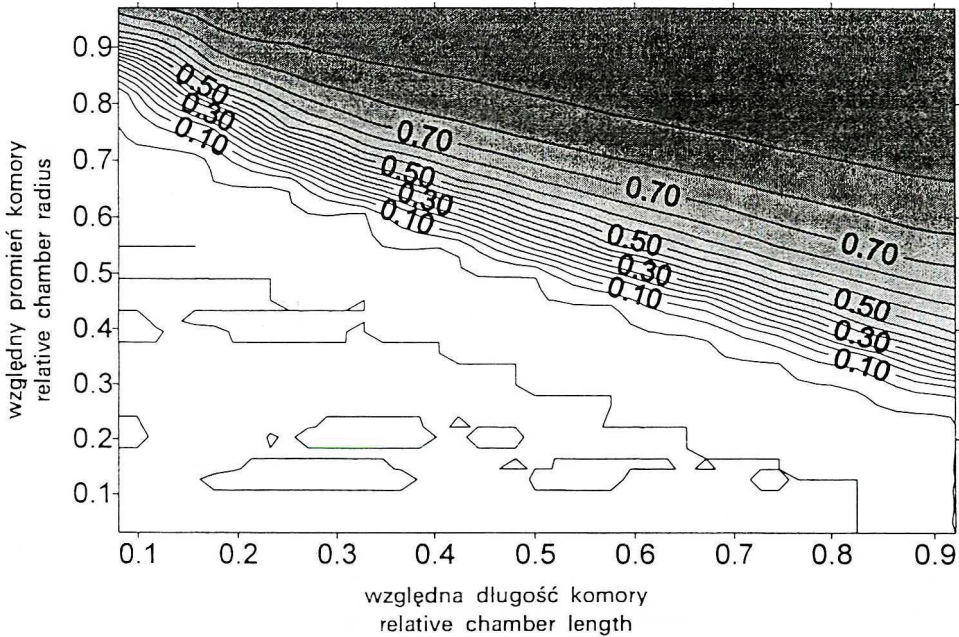
Przedstawiono również intensywność źródeł substancji lotnej obliczone jako suma ilości wilgoci oraz substancji lotnej z procesu odgazowania. Ich strumień podzielony przez objętość danego elementu jest wydajnością objętościową źródeł substancji lotnych g_v .

Na kolejnych rysunkach 7 – 11 przedstawiono wykresy następujących wielkości:

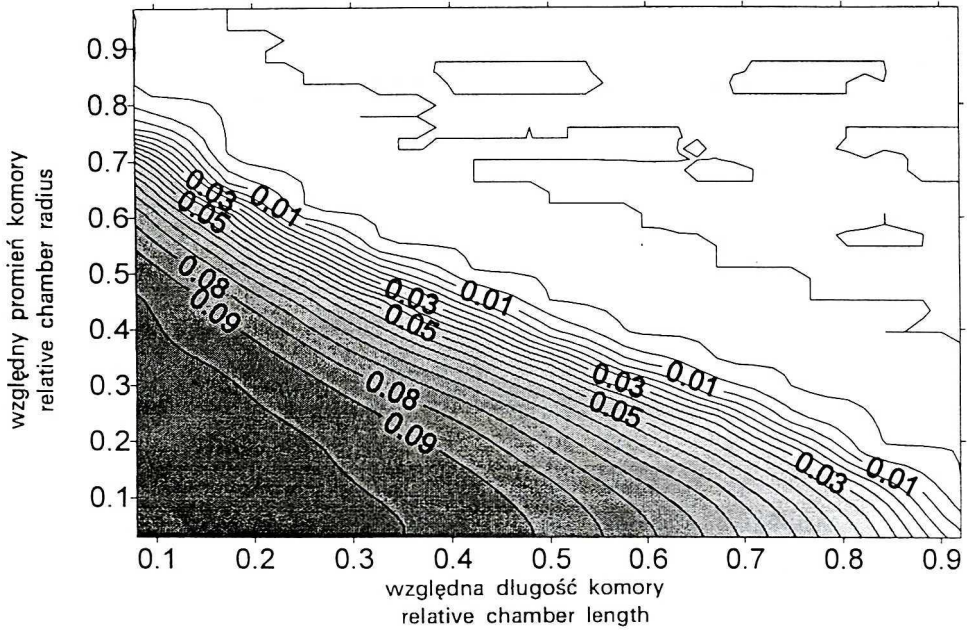
- temperatura – rys. 7,
- stosunek odgazowania zupełnego – rys. 8,
- wilgotność – rys. 9,
- entalpia spalania substancji lotnej – rys. 10,
- intensywność źródeł substancji lotnej (suszenie + odgazowanie) – rys. 11.



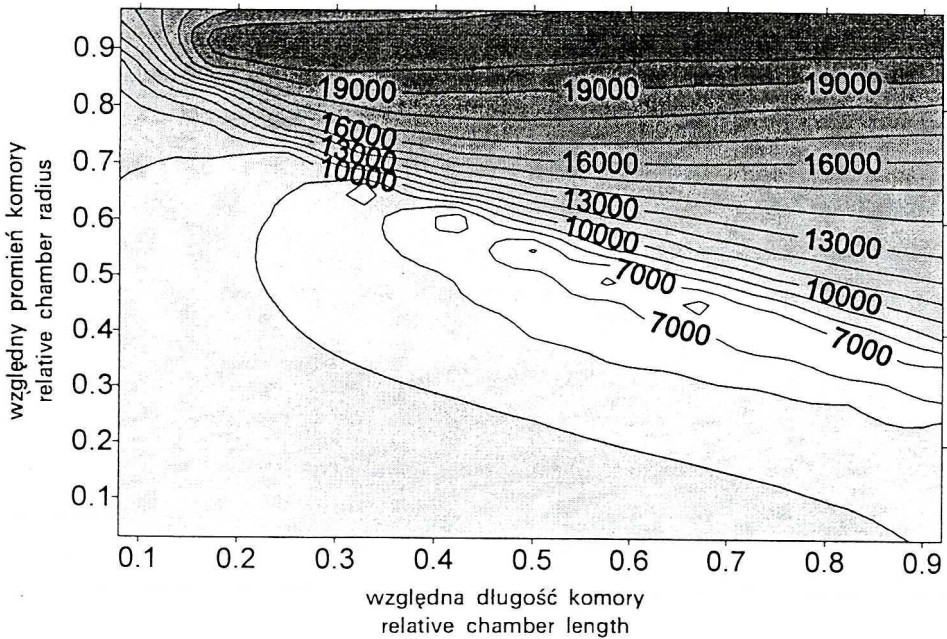
Rys. 7. Zmiana temperatury wsadu w komorze pirolitycznej – $t = t(h, r)$, °C
 Temperature field in the pyrolysis chamber – $t = t(h, r)$, °C



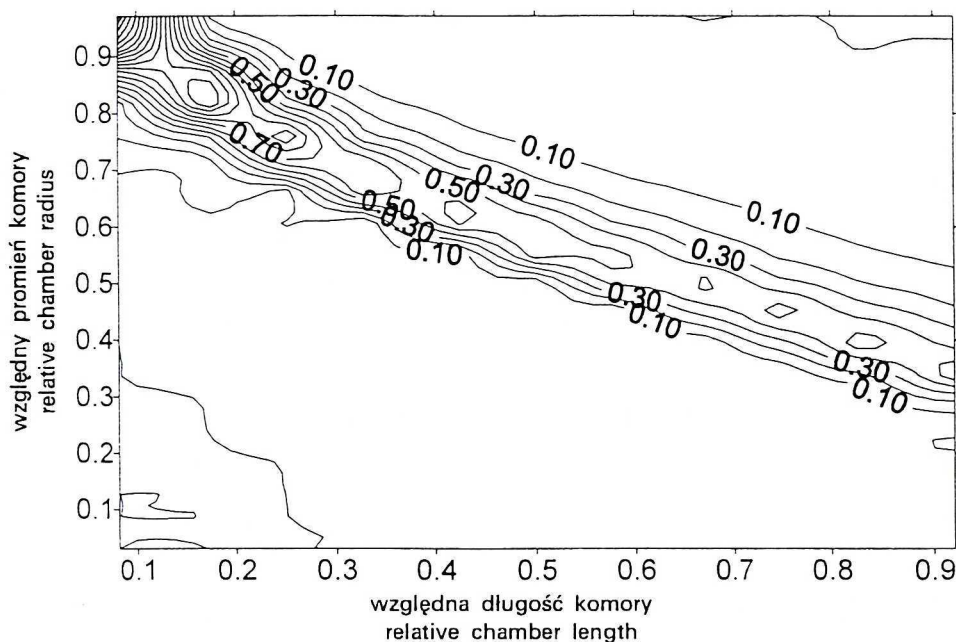
Rys. 8. Zmiana stosunku odgazowania zupełnego wsadu w komorze pirolitycznej – $z_T = z_T(h, r)$
 Devolatilisation ratio of the material in the pyrolysis chamber – $z_T = z_T(h, r)$



Rys. 9. Zmiana wilgotności wsadu w komorze pirolitycznej – $w = w(h, r)$
 Moisture of the material in the pyrolysis chamber – $w = w(h, r)$



Rys. 10. Zmiana entalpii spalania powstającej substancji lotnej w komorze pirolitycznej –
 $W_{gt} = W_{gt}(h, r)$, kJ/kg
 Upper heating value of the volatile matter in the pyrolysis chamber – $W_{gt} = W_{gt}(h, r)$, kJ/kg



Rys. 11. Zmiana wydajności objętościowych źródeł substancji lotnej w komorze pirolitycznej
 – $g = g(h, r)$, $\text{kg}/(\text{sm}^3)$

Unit devolatilisation rate in the pyrolysis chamber – $g = g(h, r)$, $\text{kg}/(\text{sm}^3)$

Rys. 7 przedstawia rozkład temperatury wewnątrz komory w ustalonych warunkach jej pracy (stała wydajność, ustalone warunki wymiany ciepła) – temperatura wsadu rośnie w kierunku osi i w dół komory. Rys. 8 i 9 są konsekwencją rozkładu temperatury (rys. 7), ponieważ założono, że stosunek odgazowania i wilgotność wsadu zależą jedynie od jego temperatury, zgodnie z charakterystyką odgazowania.

Na rys. 10 przedstawiono lokalne wartości entalpii spalania substancji lotnej powstającej w komorze – zgodnie z wynikami pomiarów laboratoryjnych. Rys. 11 obrazuje intensywność wydzielania się substancji lotnej i pozwala na analizę jej rozptyłu wewnątrz wsadu.

PODSUMOWANIE

Modelowanie złożonych procesów cieplnych ma na celu poznanie zachodzących zjawisk oraz wpływu podstawowych parametrów na przebieg procesu. Zadanie to spełnia przedstawiony model obliczeniowy procesu odgazowania odpadów w reaktorze pirolitycznym. Model ten obejmuje wszystkie zasadnicze procesy zachodzące we wsadzie: podgrzewanie, suszenie i odgazowanie [7].

Dokładność takiego modelu zależy zarówno od przyjętych założeń upraszczających, jak i od dokładności wprowadzonych danych materiałowych. W modelu przyjęto, że substancja stała przesuwana się w dół wzdłuż osi cylind-

drycznej komory, natomiast substancja lotna może przemieszczać się w różnych kierunkach zależnie od rozkładu ciśnienia w porowatym wsadzie. Dane dotyczące procesu odgazowania wsadu określono na drodze badań laboratoryjnych, natomiast właściwości cieplne części stałych i lotnych przyjęto na podstawie literatury.

Sprawdzeniem poprawności modelu są obliczenia przestrzennych zmian głównych parametrów, takich jak temperatura części stałych, temperatura części lotnych, rozływ substancji lotnej we wsadzie, stopień odgazowania wsadu – wyniki takich obliczeń przedstawiono na wykresach. Ich przebiegi są logiczne i dają się wytłumaczyć na drodze fizycznej.

Przedstawiony model został zweryfikowany na stanowisku doświadczalnym i wykazał zadowalającą zgodność z wynikami pomiarów. Może on być stosowany do optymalizacji konstrukcji cylindrycznych komór odgazowujących oraz, po adaptacji, do modelowania procesu pirolizy w innych warunkach.

OZNACZENIA

c	ciepło właściwe (c_p – przy stałym ciśnieniu), kJ/(kgK)
D, d	średnica, m
g	wydajność objętościowa źródeł substancji lotnej, kg/(sm ³)
H, h	wysokość, m
I	entalpia strumienia czynnika, kW/kg
I	entalpia właściwa, kJ/kg
m	strumień czynnika, kg/s
Q	strumień ciepła, kW
P, p	ciśnienie, Pa
r	promień komory, m
r	entalpia parowania wody, kJ/kg
T_n	temperatura normalna, K
T, t	temperatura, K, °C
V	objętość, m ³
w	zawartość wilgoci
W_g	entalpia spalania kJ/kg
z, z_T	stosunek odgazowania, stosunek odgazowania zupełnego
x	współrzędna geometryczna
α	współczynnik wnikania ciepła, W/(m ² K)
ε	porowatość warstwy
λ_t	współczynnik przewodzenia ciepła, W/(mK)
φ_p	współczynnik przepływu substancji w złożu porowatym, s
τ	czas, s

INDEKSY

i, j	współrzędne pierścienia elementarnego
k	karbonizat
l	lotne części
lh	lotne przepływające w kierunku osiowym
lr	lotne przepływające w kierunku promieniowym
o	wartości początkowe
p	przewodzenie, przepływowe (wsad jako złożo porowate)
p	popiół, substancja mineralna
s	stałe części (karbonizat)
w	wilgoć

PODZIĘKOWANIE

Praca została wykonana przy wsparciu finansowym Komitetu Badań Naukowych w formie grantu promotorskiego 8T10B 044 15.

LITERATURA

- [1] *Dokumentacja techniczna prototypowej instalacji do spalania odpadów poszpitalnych*, Katedra Aparatury Ciepłej i Utylizacji Odpadów. Politechnika Śląska, Gliwice 1990.
- [2] Postrzednik S.: *Analiza termodynamiczna procesu odgazowania paliw stałych*, Politechnika Śląska, Zeszyty Naukowe, nr 691, Gliwice 1981.
- [3] Postrzednik S.: *Przepływ substancji przez odgazowujący wsad węglowy*, Archiwum Termodynamiki, vol. 4, nr 4, 1983.
- [4] Van Ginneken C.P.M.: *Low temperature pyrolysis of waste fractions in a spout-fluid bed reactor*, Praca doktorska. Eindhoven University of Technology, Netherlands, 1982.
- [5] Troniewski L.: *Tablice do obliczeń procesowych*, Wyższa Szkoła Inżynierska w Opolu. Skrypt uczelniany, nr 117, Opole 1987.
- [6] Wacławiak K., J. Nadziakiewicz: *Wpływ temperatury odgazowania biomasy na uzysk karbonizatu i jego entalpię chemiczną*, Konferencja Paliwa z Odpadów'99, Międzybrodzie Żywieckie 1999.
- [7] Wacławiak K.: *Modelowanie procesu odgazowania w komorze pirolitycznej instalacji do odgazowania odpadów szpitalnych*, Praca doktorska, Politechnika Śląska, 1999.