

Stanisław J. GDULA, Ryszard BIAŁECKI,  
Kazimierz KURPISZ, Andrzej NOWAK,  
Andrzej SUCHETA

Instytut Techniki Ciepłej

## WYZNACZANIE PRZEBIEGU IZOTERM W TRZONIE WIELKIEGO PIECA

**Streszczenie.** W pracy opisano metodę rozwiązywania zagadnienia przepływu ciepła w trzonie wielkiego pieca, dla rozmaitych wyłożeń i sposobów chłodzenia. Poszczególne elementy chłodzące i trzon traktowano jako elementy autonomiczne. Pola temperatury w tych obszarach poszukiwano niezależnie metodami analitycznymi bądź numerycznymi. Zastosowano oryginalną metodę łączenia rozwiązań uzyskiwanych w poszczególnych obszarach pozwalającą uwzględnić warunek brzegowy IV rodzaju.

### 1. Wstęp

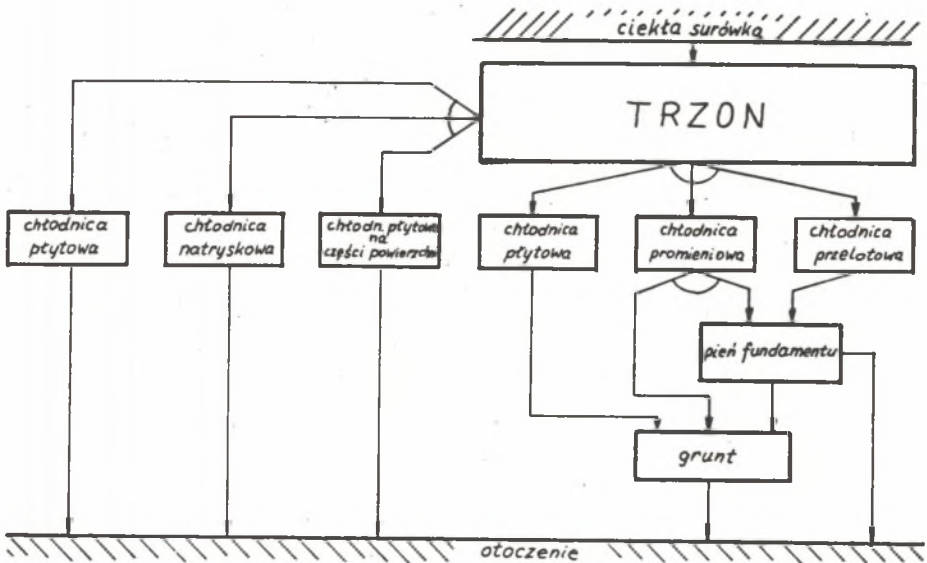
Celem niniejszej pracy jest kompleksowy opis zjawisk wymiany ciepła dla aktualnie stosowanych konstrukcji wyłożeń i systemów chłodzenia wielkich pieców, z możliwością uzmiennienia parametrów konstrukcyjnych i termodynamicznych, w celu poszukiwania rozwiązań optymalnych.

Do wyłożeń trzonów wielkich pieców stosuje się różnorodne materiały węglowe i szamotowe. Ich dobór oraz rozmieszczenie w trzonie zależne są od konstrukcji trzonu, a głównie od systemu chłodzenia. W najprostszej konstrukcji ciepło odprowadzane jest przez fundament do gruntu oraz przez ściany zewnętrzne do otoczenia. Zastosowanie warstwy bloków grafitowych zwiększa ilości odprowadzonego ciepła w kierunku promieniowym. W nowszych konstrukcjach, dzięki stosowaniu chłodnic podtrzonowych powietrznych (promieniowych lub przelotowych) lub płytowych wodnych, zwiększa się intensywność chłodzenia trzonu, a tym samym zmniejsza się jego wysokość.

W opisie zjawisk wymiany ciepła wyodrębniono następujące niezależne elementy (moduły):

- trzon z garem i surówką,
- chłodnica podtrzonowa powietrzna (promieniowa lub przelotowa),
- chłodnica podtrzonowa płytowa,
- chłodnica płytowa boczna,
- fundament i grunt.

Z elementów tych można złożyć wszystkie typowe konstrukcje trzonów. Schemat blokowy przepływu ciepła między poszczególnymi elementami przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat blokowy przepływu ciepła w trzonie i garze wielkiego pieca

Rozwiązanie problemu wymaga zsywania rozwiązań dla poszczególnych elementów leżących na drodze przepływu ciepła od powierzchni surówki do otoczenia. Zsywanie to polega na zastosowaniu warunków brzegowych IV rodzaju, wyrażających równość temperatur i strumieni ciepła na styku elementów. Stosowanie metody zsywania eliminuje konieczność równoczesnego rozwiązywania równań opisujących wymianę ciepła w trzonie w elementach odprowadzających ciepło, a jedynie iterowanie temperatur na styku. Umożliwiło to także dużą dowolność w operowaniu warunkami brzegowymi.

## 2. Model przepływu ciepła w trzonie wielkiego pieca

Z uwagi na to, że trzon jest układem wielowarstwowym, a ponadto współczynniki przewodzenia ciepła są funkcjami temperatury, do rozwiązania zagadnienia zastosowano metodę różnicową. Założono, że przewodzenie ciepła w trzonie i garze opiswane jest równaniem Fouriera-Kirchhoffa dla stanu ustalonego, bez wewnętrznych źródeł ciepła i z pominięciem ruchów konwekcyjnych surówki w garze. Wpływ ruchów konwekcyjnych uwzględnia się przez przyjęcie odpowiednio zwiększonego współczynnika przewodzenia ciepła.

W układzie osiowo-symetrycznym równanie to przyjmuje postać:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0$$

Równanie to rozwiązywano przy następujących warunkach brzegowych:

- w przekroju pieca na wysokości osi otworu spustowego surówki
  - a) w obszarze kołowym zajmowanym przez surówkę temperatura jest stała i znana,
  - b) w obszarze promieniowym utworzonym przez warstwy wyłożenia i pancerz wymiana ciepła odbywa się tylko w kierunku promieniowym,
- na pobocznicy pancerza
  - a) przy chłodzeniu przez natrysk wody lub chłodzenie naturalne - warunek brzegowy III rodzaju,
  - b) przy chłodzeniu przez chłodnicę płytową
    - warunek brzegowy IV rodzaju (zszywanie elementów)
- na dnie trzonu
  - warunek brzegowy IV rodzaju (zszywanie elementów)
- na granicy faz
  - warunek brzegowy IV rodzaju (temperatura jest równa temperaturze krzepnięcia surówki)
- w osi trzonu
  - warunek symetrii osiowej.

Zagadnienie przepływu ciepła w trzonie rozwiązano metodą bilansów elementarnych. Podział różnicowy może być dokonany na dowolną ilość elementów pierścieniowych, niezależnie od układu warstw materiałowych. Uwzględniono przy tym fakt, że trzon wielkiego pieca może mieć kształt walcowy lub stożkowy.

Opory przepływu ciepła wyznaczano w sposób klasyczny wg zasad opisanych w [4]. Dla elementów niejednorodnych, w których występują granice warstw, wykorzystano zasadę szeregowego i równoległego łączenia oporów.

Położenie i kształt izotermy krzepnięcia wynika z aktualnego pola temperatur. Przyjęto, że w obszarach, gdzie temperatura jest wyższa od temperatury krzepnięcia  $T_k$  występuje surówka. Położenie izotermy krzepnięcia wyznaczono metodą interpolacji, zaś kształt zastępowano linią łamaną, której przebieg zależał od temperatur w węzłach sąsiednich. Uwzględniono przy tym fakt, że w odróżnieniu od materiałów węglowych, materiały szamotowe praktycznie w surówce się nie rozpuszczają i granica faz pokrywa się z granicą szamoty.

Otrzymany układ równań różnicowych rozwiązywano metodą nadrelaksacji. Współczynnik nadrelaksacji zmieniano podczas obliczeń, wzorując się na metodzie cyklicznej Czebyszewa.

Zastosowanie zmiennego współczynnika nadrelaksacji wielokrotnie przyspiesza osiągnięcie żądanej dokładności.

### 3. Elementy odprowadzające ciepło od trzonu

#### 3.1. Grunt

Przyjęto, że przepływ ciepła w gruncie pod wielkim piecem może być opisany następująco:

- przepływ ciepła w gruncie jest ustalony i pole temperatury jest polem osiowo-symetrycznym w ośrodku półnieskończonym,
- w dużej odległości od osi trzonu, temperatura jest równa temperaturze otoczenia zaś strumień ciepła jest zerowy,
- na powierzchni gruntu  $z = 0$  temperatura jest równa temperaturze otoczenia za wyjątkiem okręgu  $r \leq R$ , gdzie temperatura może być opisana równaniem:

$$T(r, z) = T_{ot} + \sum_{i=1}^n A_i \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right]^{i + \frac{1}{2}}, \quad (3.1)$$

gdzie:

$T(r, z)$  - temperatura,

$r, z$  - współrzędne,

$R$  - promień dolnej podstawy trzonu wielkiego pieca na poziomie gruntu,

$A_i$  - niewiadome stałe.

Powierzchnię  $z = 0$   $r \leq R$  podzielono na  $m \geq n$  koncentrycznych pierścieni promieniami  $r_j$  ( $r_0 = 0$ ,  $r_m = R$ ).

W każdym z pierścieni obrano węzeł  $R_j$ , tak aby  $r_{j-1} < R_j < r_j$ . (Taki podział różnicowy ściśle odpowiada podziałowi różnicowemu spodu trzonu wielkiego pieca).

Oznaczmy strumień ciepła

$$\dot{Q}_j = 2\pi\lambda \int_{r_{j-1}}^{r_j} \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} dr, \quad (3.2)$$

gdzie:

$\lambda$  - współczynnik przewodzenia ciepła gruntu

i temperatury

$$T_1 = T(R_j, 0), \quad (3.3)$$

Niech współczynniki  $A_i$  będą dobrane w ten sposób, aby

- wielomian (3.1) najlepiej aproksymował temperatury  $T_i$  w sensie najmniejszych kwadratów,
- na powierzchni  $z = 0$   $r \leq R$  spełniony był IV warunek brzegowy.

Te żądania równoznaczne są z liniową zależnością między strumieniami ciepła  $\dot{Q}_j$  i temperaturami  $T_i$  [1]

$$\dot{Q}_j = \sum_{i=1}^m B_{ij} T_i + B_{j0} \quad j = 1, m, \quad (3.4)$$

gdzie  $B_{ij}$  stałe obliczone z warunków a i b [3].

Równanie (3.4) traktowane jest przy poszukiwaniu rozkładu temperatury w trzonie lub chłodnicy promieniowej jak uogólniony warunek brzegowy trzeciego rodzaju typu  $\dot{Q}_j = \frac{\alpha}{\lambda} T_j + B_j$ , przy czym skalarowi  $\frac{\alpha}{\lambda}$  odpowiada macierz B.

### 3.2. Pień fundamentu

Rozkład temperatury w pniu fundamentu spełnia następujące zagadnienie brzegowe:

- przepływ ciepła w pniu jest ustalony a pole temperatury jest osiowo symetryczne,
- spód pnia jest izolowany cieplnie,
- pobocznica ma temperatury otoczenia,
- górna powierzchnia ma temperaturę, która spełnia równanie

$$T(r, 0) = T_{ot} + \sum_{i=1}^m A_i J_0(\mu_i \frac{r}{R}), \quad (3.5)$$

gdzie:

- $J_0(x)$  - funkcje Bessela 1 rodzaju rzędu 0,
- $\mu_i$  - pierwiastki równania  $J_0(\mu_i) = 0$ ,
- $T(r, z)$  - temperatura,
- $r, z$  - współrzędne,
- $R$  - promień dolnej podstawy trzonu wielkiego pieca,
- $A_i$  - niewiadome stałe.

Na współczynniki  $A_i$  nakładamy warunki:

- wielomian (3.5) jest wielomianem interpolującym temperatury  $T_i$ ,
- na powierzchni pnia spełniony jest warunek brzegowy IV rodzaju.

Warunki a i b równania równoważne są równaniu liniowemu:

$$\dot{Q}_j = \sum_{i=1}^m C_{ij} T_i + C_{j0} \quad j = 1, m, \quad (3.6)$$

gdzie:

$C_{ij}$  - stałe.

Równanie (3.6) podobnie jak (3.1) traktowane jest dalej jak warunek brzegowy.

### 3.3. Chłodnica płytowa

Ze względu na skomplikowaną geometrię równania przepływu ciepła w chłodnicy płytowej rozwiązywano numerycznie [2], [3]. Z założonej liniowości zagadnienia brzegowego opisującego przepływ ciepła w chłodnicy wynika liniowa zależność między strumieniami ciepła i temperaturami na powierzchni S styku chłodnicy i trzonu wielkiego pieca. Zależność tę można zapisać [3]

$$\dot{Q}_j = \sum_{i=1}^m D_{ij} T_i + D_{j0}, \quad j = 1, m \quad (3.7)$$

gdzie:

$D_{ij}$  - stałe,

$\dot{Q}_j$  - strumień ciepła wpływającego do j-tej komórki elementarnej na powierzchni S,

$T_i$  - temperatury na tej powierzchni.

Równanie (3.7) jest analogiczne do równań (3.1) i (3.6) i można się nim posługiwać jak warunkiem brzegowym.

### 3.4. Niechłodzona część pobocznicy trzonu wielkiego pieca

Przewidziano możliwość, że część pobocznicy trzonu wielkiego pieca może nie być chłodzona lub być chłodzona przez natrysk powierzchniowy, podczas gdy dla reszty pobocznicy ciepło odbierane jest przez chłodnice płytowe.

W celu obliczenia przepływu ciepła przez taką powierzchnię wycina się z trzonu warstwę walcową będącą przedłużeniem warstwy chłodnic płytowych. W warstwie tej rozwiązuje się równanie przepływu ciepła numerycznie. Przewodzi to do równań analogicznych do (3.1), (3.6), (3.7).

### 3.5. Chłodnica promieniowa

Ciepło od trzonu i fundamentu jest przekazywane do czynnika chłodzącego na drodze konwekcji i promieniowania. Uwzględniając powyższe procesy, równania bilansu dla poszczególnych elementów różnicowych przybierają następującą postać:

- dla trzonu

$$\dot{Q}_j(T) = \pi \Delta r_j (\Delta r_j + 2r_j) \left\{ c \varepsilon_r \varepsilon_G \sum_{i=1}^N \varphi_{ij} \left[ \left( \frac{T}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{Gi}}{100} \right)^4 \right] + \alpha_j (T - T_p) \right\} \quad (3.8)$$

- dla gruntu

$$\dot{Q}_i(T) = \pi \Delta r_i (\Delta r_i + 2r_i) \left\{ c \varepsilon_r \varepsilon_G \sum_{j=1}^N \varphi_{ij} \left[ \left( \frac{T_{Gi}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T}{100} \right)^4 \right] + \alpha_i (T_p - T) \right\} \quad (3.9)$$

gdzie:

- $r_i, \Delta r_i$  - elementy podziału różnicowego,
- $\varepsilon_r, \varepsilon_G$  - emisyjności trzonu i gruntu,
- $T_p$  - temperatura powietrza chłodzącego,
- $\varphi_{ij}$  - współczynniki konfiguracji,
- $\alpha$  - współczynnik wnikania ciepła,
- $T_{Gi}, T_{rj}$  - temperatury gruntu i dna trzonu w węzłach.

Równania te rozwiązywano metodą Newtona wyznaczając tym samym rozkład temperatury na dnie trzonu i powierzchni fundamentu. Konwekcyjny współczynnik wnikania ciepła obliczano z równań kryterialnych [5].

### 4. Przykład obliczeniowy

Poniżej przedstawiono wyniki przykładowych obliczeń dla stożkowego trzonu wielkiego pieca. Pancierz trzonu chłodzony jest przez natrysk wody o temperaturze 293 K. Przyjęto współczynnik wnikania ciepła równy 1000 W/m<sup>2</sup>K. Dno trzonu chłodzone jest za pomocą chłodnicy promieniowej o wysokości 0,4 m. Przyjęto średnią temperaturę powietrza chłodzącego 298 K, a strumień 9,5 kg/s. Emisyjności dna trzonu i powierzchni gruntu przyjęto odpowiednio 0,8 i 0,94, a współczynnik przewodzenia ciepła dla gruntu 1,0 W/m K.

Charakterystyczne wymiary geometryczne są następujące:

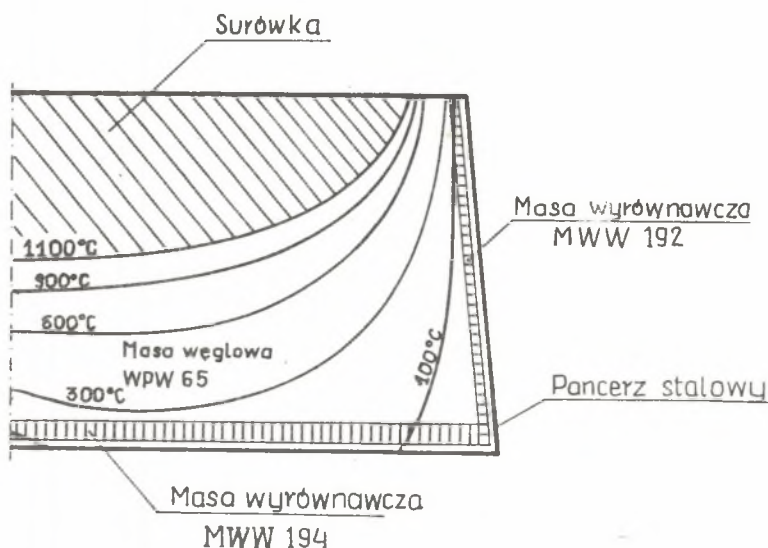
- promień górnej podstawy trzonu 4,65 m
- promień dolnej podstawy trzonu 4,91 m
- wysokość trzonu (od osi otworu spustowego) 3,58 m



- początkowa głębokość kotliny	0,82 m
- początkowa grubość wykładziny węglowej	2,48 m
- grubość blachy stalowej pancerza	0,06 m
- grubość blachy stalowej dna	0,1 m

Przyjęto następujące temperatury charakterystyczne:

- temperatura w osi otworu spustowego	1773 K
- temperatura krzepnięcia surówki	1373 K
- temperatura otoczenia	293 K



Rys. 2. Przebieg izoterm w trzonie wielkiego pieca

#### LITERATURA

- [1] Białecki R.: Łączenie rozwiązań numerycznych i analitycznych dla ustalonych pól temperatury w ciałach stałych. Referat na Sympozjum Wymiany Ciepła i Masy. Jabłonna 1976.
- [2] Białecki R., Sucheta A.: Wyznaczenie ustalonego pola temperatury i rozprzysku strumieni ciepła w chłodnicy płytowej wielkiego pieca. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej s. Energetyka z. 57 1976 s. 57-71.
- [3] Gdula S.J. i zesp.: Metody obliczenia i programowania izoterm w wyłóżeniach węglowych wielkich pieców - praca naukowo-badawcza NB-438/RME -3/76 nie publikowana.
- [4] Szargut J.: Metody numeryczne w obliczeniach cieplnych pieców przemysłowych. "Śląsk", Katowice 1977.
- [5] Wilms E., Diefenbach L.: Betrachtungen zur Haltbakeitsgrenze von Hochfengestellten Stahl u. Eisen, 88. 1968, Nr 11.



## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ИЗОТЕРМ В ЛЕЩАДИ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

## Р е з ю м е

В работе представлен метод решения проблемы теплообмена в лещади доменной печи для разнообразных кладок и систем охлаждения. Отдельные охлаждающие элементы и лещадь считались автономическими. Температурные в этих элементах определялись независимо друг от друга аналитическими или численными методами.

Применён оригинальный метод совмещения решений, получаемых в отдельных элементах, позволяющий учесть краевое условие IV вида.

## DETERMINING ISOTHERMAL LINES IN A BLAST FURNACE BOTTOM

## S u m m a r y

A method of solving the steady state heat conduction equation in a blast furnace bottom for various, both linings and cooling systems is presented. The boundary condition problems in every cooling element and in the blast furnace bottom were solved independently in analytical or numerical way. An original method of coupling solutions was developed. The solution obtained by the aid of this method fulfils the IV th boundary condition on the surface of the contact.