ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1976

Seria: ENERGETYKA z.57 Nr kol. 493

Ryszard BIAŁECKI, Andrzej SUCHETA
Instytut Techniki Cieplnej

WYZNACZANIE USTALONEGO POLA TEMPERATURY I ROZPŁYWU STRUMIENI CIEPŁA W CHŁODNICY PŁYTOWEJ WIELKIEGO PIECA

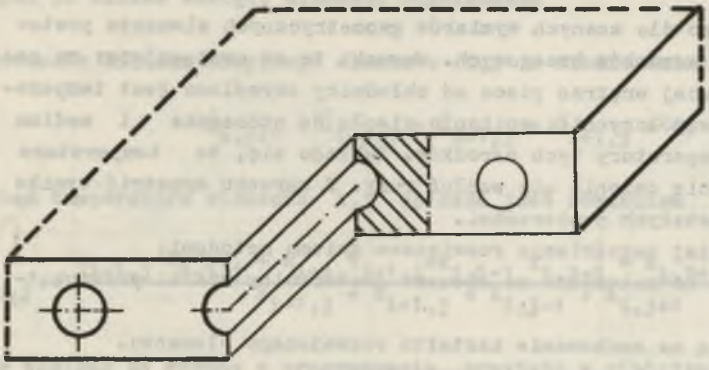
Streszczenie: W pracy podano prostą metodę obliczeń cieplnych wybranych wariantów rozpatrywanego typu konstrukcyjnego płytowej chłodnicy podtrzonowej. Opracowano uniwersalny program na EMC do obliczeń dowolnego wariantu chłodnicy. Program ten może być stosowany do projektowania dowolnych chłodnic płytowych, a także innych urządzeń cieplnych o podobnej geometrii (np. płyt grzejnych). Może on służyć do optymalizacji wymiarów geometrycznych wspomnianych urządzeń i zastosowanych do ich budowy materiałów.

1. WSTĘP

Chłodnice płytowe stosowane są w hutnictwie między innymi do chłodzenia trzonu wielkiego pieca. Podtrzonowe chłodnice płytowe pozwalają uzyskać znaczną oszczędność materiału węglowego stanowiącego trzon wielkiego pieca. Konstrukcja taka stosowana jest w nowszych rozwiązaniach projektowych [1].

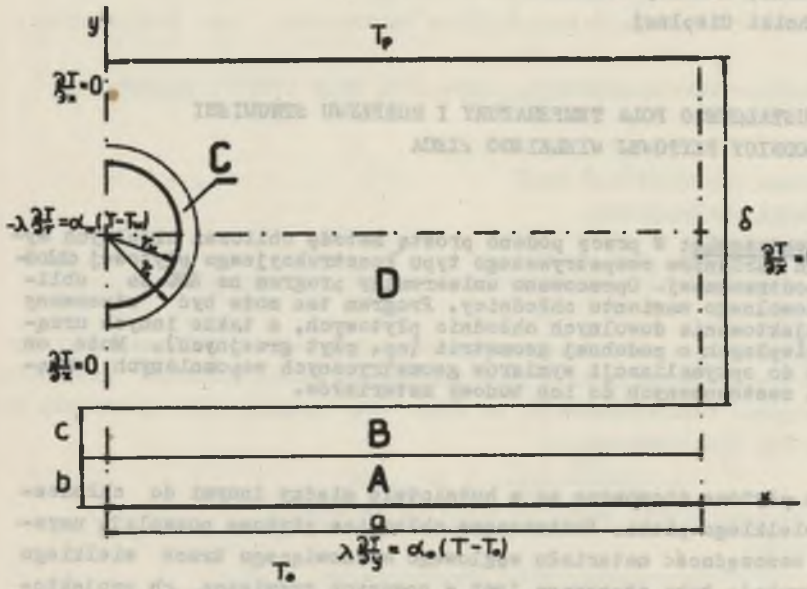
Problem wyznaczenia pola temperatury i obliczenia rozpływu strumieni w trzonie zaopatrzonym w chłodnice płytowe został rozwiązany przez S.J.Gdulę i T. Malkiewicza [2].

Z zagadnieniem tym łączy się dobór parametrów wspomnianych wyżej chłodnic.



Rys. 1. Pojedynczy segment chłodnicy

Z pojedynczego segmentu chłodnicy (rys. 1) wyodrębniono dwuwymiarowy element powtarzalny (rys. 2).
Płyta chłodnicy składa się z kilku warstw.



Rys. 2. Powtarzalny dwuwymiarowy element chłodnicy

Warstwę A stanowi pancerz stalowy, oddzielony węglową warstwą B od żeliwnego korpusu D. W rurze stalowej C płynie medium chłodzące (woda lub powietrze).
W chłodnicy następuje przepływ ciepła z wnętrza pieca do czynnika chłodzącego i otoczenia.

Problem rozwiązano dla znanych wymiarów geometrycznych elementu powtarzalnego i zadanych warunków brzegowych. Warunki te są następujące: na powierzchni oddzielającej wnętrze pieca od chłodnicy określona jest temperatura T_p, znane są współczynniki wnikania ciepła do otoczenia i medium chłodzącego oraz temperatury tych ośrodków. Zakłada się, że temperatura medium chłodzącego nie zmienia się wzdłuż rury. Z warunku symetrii wynika adiabatyczność pozostałych powierzchni.

Przedstawione wyżej zagadnienie rozwiązano dwiema metodami:
- metodą polegającą na nałożeniu na element powtarzalny siatki prostokątnej,
- metodą pozwalającą na zachowanie kształtu rozważanego elementu.

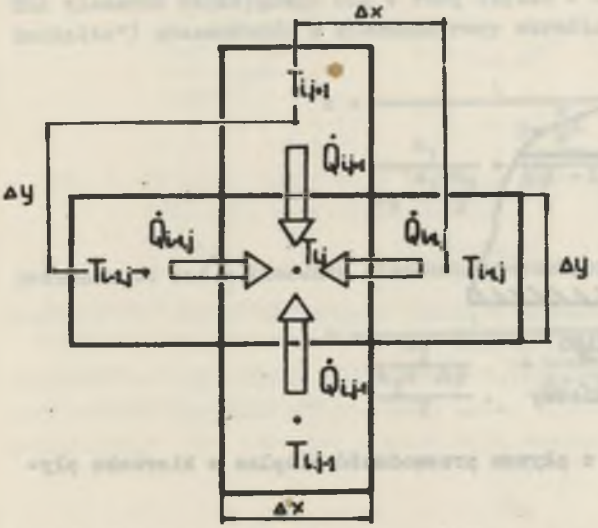
Przeliczono 3 warianty konstrukcyjne chłodnic.
Tablica 1 zawiera charakterystyczne wymiary poszczególnych wariantów chłodnic (w metrach).

Tablica 1

Lp.	a	b	c	δ	r_w	r_z
1	0,125	0,040	0,030	0,140	0,016	0,021
2	0,165	0,010	0,015	0,180	0,043	0,050
3	0,180	0,010	0,105	0,180	0,043	0,050

2. RÓWNANIA RÓŻNICOWE

W obu wspomnianych metodach zastosowano metodę bilansów elementarnych Waniczewa [3].



Rys. 3. Bilans energii elementu różnicowego

Równanie bilansu cieplnego elementu i,j w stanie ustalonym ma postać

$$\dot{Q}_{i,j+1} + \dot{Q}_{i,j-1} + \dot{Q}_{i-1,j} + \dot{Q}_{i+1,j} = 0, \tag{1}$$

stąd temperatura elementu i,j opisana jest równaniem

$$T_{i,j} = \frac{k_{i-1,j}\, T_{i-1,j} + k_{i+1,j}\, T_{i+1,j} + k_{i,j-1}\, T_{i,j-1} + k_{i,j+1}\, T_{i,j+1}}{k_{i-1,j} + k_{i+1,j} + k_{i,j-1} + k_{i,j+1}} \tag{2}$$

Ze względu na wygodę w programowniu, przyjęto w niniejszej pracy używać odwrotność oporu cieplnego. Rozważamy bowiem przypadek stykania się elementu różnicowego z płaszczyzną adiabatyczną. Odwrotność oporu cieplnego od elementu różnicowego do tej płaszczyzny jest równa zero. Opór cieplny

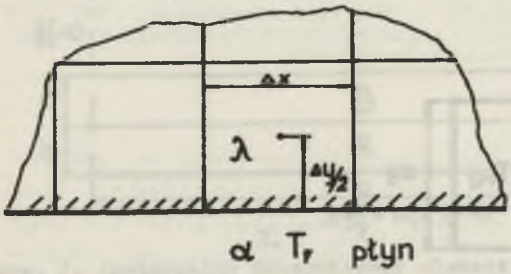
natomiast, równy jest nieskończoności, co jest niewygodne w obliczeniach na EMC. Odwrotność oporu cieplnego zwana będzie dalej przewodnością cieplną i oznaczana $k_{1,m}$.
Tak więc przykładowo symbol

$k_{i+1,j}$ oznacza - dla elementu siatki prostokątnej równomiernej nie sąsiadującego z płynem

$$k_{i+1,j} = \frac{\lambda \Delta y}{\Delta x}$$

zaś

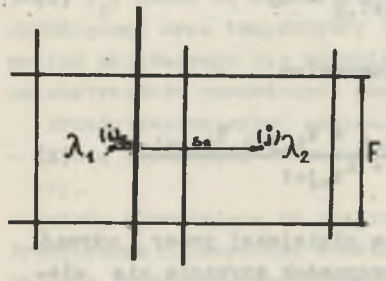
$$k_{i,j+1} = \frac{\lambda \Delta x}{\Delta y}$$



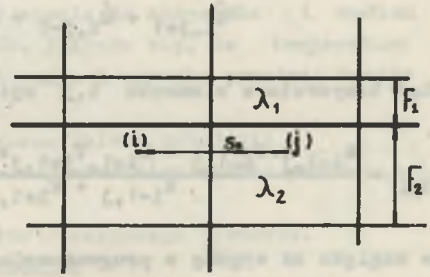
Rys. 4. Brzegowy element różnicowy

Dla elementu stykającego się z płynem przewodność cieplna w kierunku płynu wynosi

$$k_{i,F} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \frac{\Delta y}{2 \cdot \Delta x}} \tag{3}$$



Rys. 5. Elementy różnicowe na styku dwóch ośrodków o różnych współczynnika przewodzenia ciepła



Rys. 6. Elementy różnicowe na styku dwóch ośrodków o różnych współczynnika przewodzenia ciepła

Jeżeli sąsiadujące ze sobą elementy leżą w materiałach o różnych wartościach współczynnika przewodzenia ciepła, to wartość przewodności cieplnej między nimi określają zależności:

$$k_{i,j} = \frac{1}{\frac{S_1}{\lambda_1 F} + \frac{S_2}{\lambda_2 F}}, \tag{4}$$

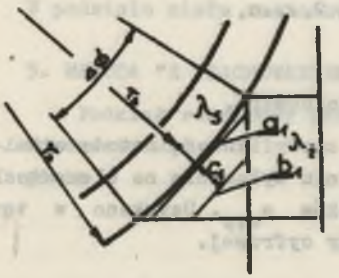
$$k_{i,j} = \frac{\lambda_1 F_1}{S_3} + \frac{\lambda_2 F_2}{S_3} \tag{5}$$

Dla elementu stykającego się z rurą (tylko w metodzie "z zachowaniem kształtu") przewodność w kierunku rury określa równanie:

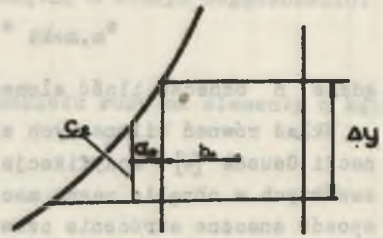
$$k = \frac{1}{\frac{c_1}{\lambda_z \frac{a_1+b_1}{2}} + \frac{\ln \frac{r_s}{r_w}}{\Delta\Phi \cdot \lambda_s}}, \tag{6}$$

przewodność zaś w kierunku elementu prostokątnego:

$$k = \frac{1}{\frac{a_2}{\frac{c_2+\Delta y}{2}} + \frac{b_2}{\Delta y \cdot \lambda}}. \tag{7}$$



Rys. 7. Element różnicowy stykający się z rurą



Rys. 8. Element różnicowy stykający się z rurą

3. ROZWIĄZANIE UKŁADU RÓWNAŃ RÓŻNICOWYCH

Układ równań bilansów elementarnych (2) jest układem równań liniowych (dla stałych wartości przewodności cieplnych). Może on być zapisany w postaci:

$$a_{m,m}\,T_m + \sum_{p}^{n} a_{m,p}\,T_p = b_m, \tag{8}$$

gdzie: sumowanie po p rozciąga się po numerach wszystkich "sąsiadów" elementu m.
Współczynniki macierzy $a_{m,p}$ oraz b_m wyznaczono według prawideł podanych w [3].
Macierz współczynników tego układu jest macierzą pasmową (wielodiagonalną). W metodzie uproszczonej posiada on następujące elementy niezerowe:

$$a_{m,m} \neq 0$$

$$a_{m,m-1} \neq 0$$

$$a_{m,m+1} \neq 0$$

$$a_{m,m-kk} \neq 0$$

$$a_{m,m+kk} \neq 0$$

gdzie kk oznacza ilość elementów podziału odcinka "a" z rys. 2. Wielkość kk jest równą połowie szerokości pasma.
W metodzie "z zachowaniem kształtu" wprowadzenie współrzędnych biegunowych dla elementów rury powoduje pewne zaburzenie w numeracji. Połowa szerokości pasma jest w tej metodzie największą z wartości "k" spełniającej zależności

$$\left.\begin{aligned} a_{m,m-kk} &\neq 0 \\ a_{m,m+kk} &\neq 0 \end{aligned}\right. \qquad m = 1,2,\ldots n,$$

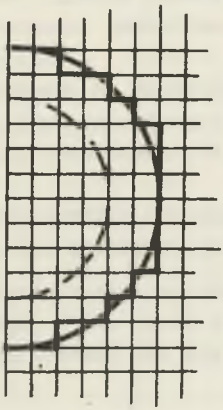
gdzie n oznacza ilość elementów podziału różnicowego.

Układ równań bilansowych został rozwiązany zmodyfikowaną metodą eliminacji Gaussa [4]. Modyfikacja polega na działaniu wyłącznie na elementach zawartych w obrębie pasma macierzy współczynników $a_{m,p}$. Uzyskano w ten sposób znaczne skrócenie czasu obliczeń maszyny cyfrowej.

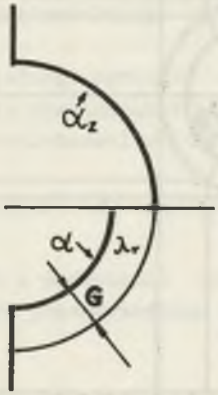
4. METODA UPROSZCZONA

Metoda uproszczona została wprowadzona w celu określenia wpływu pewnych dodatkowych założeń upraszczających na dokładność otrzymanych wyników i czas obliczeń. Założenia te polegają na zastąpieniu zewnętrznej powierzchni rury linią łamaną stanowiącą zarazem boki elementów siatki. Każ-

dy pionowy i każdy poziomy odcinek linii łamanej ma jeden punkt wspólny z powierzchnią rury. Ilustruje to rysunek.



Rys. 9. Podział różnicowy w sąsiedztwie rury w metodzie uproszczonej



Rys. 10. Zastępczy współczynnik wnikania ciepła do rury

Dodatkowym uproszczeniem jest włączenie cieplnego oporu przewodzenia przez materiał ścianki rury do oporu wnikania ciepła od strony czynnika chłodzącego. W ten sposób wprowadza się zastępczy współczynnik wnikania ciepła określony równaniem:

$$\alpha_z = \frac{1}{\frac{G}{\lambda_r} + \frac{1}{\alpha}} \tag{9}$$

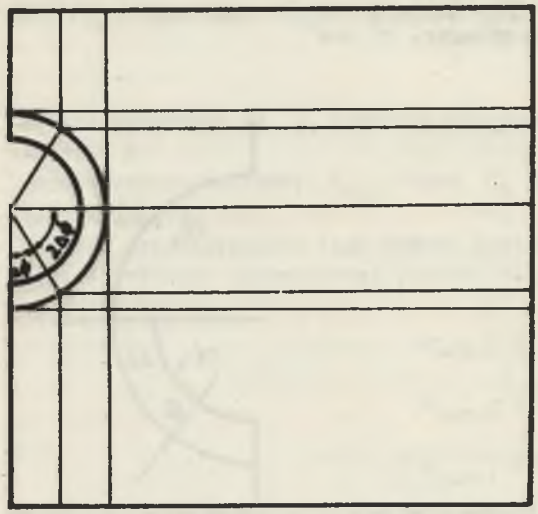
W podziale ciała zastosowano siatkę prostokątną o stałym zagęszczeniu.

5. METODA "Z ZACHOWANIEM KSZTAŁTU"

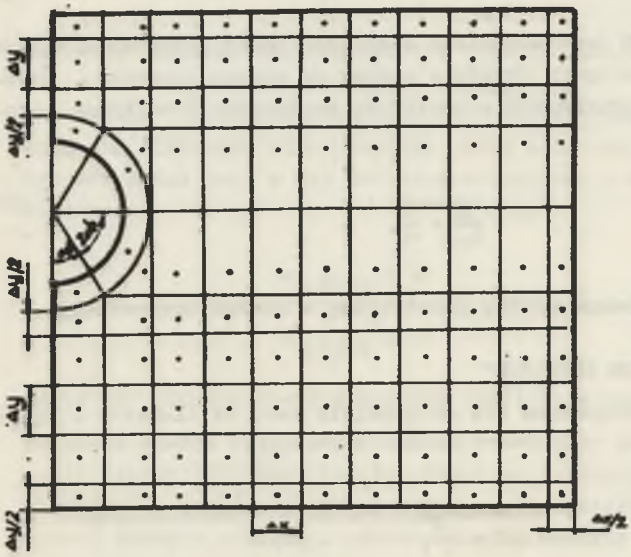
Podział różnicowy rozpoczyna się od podziału rury na elementy o kącie rozwarcia $\Delta\Phi$
gdzie

$$\Delta\Phi = \frac{\pi}{11}$$

11 - ilość elementów różnicowych w rurze (liczba parzysta).
Z podziału tego wynikają pewne linie siatki (rys. 11). Pozostałą część płyty pokrywa podział różnicowy równomierny (rys. 12) złożony z elementów prostokątnych o bokach:



Rys. 11. Podział różnicowy w obrębie rury



Rys. 12. Podział różnicowy elementu powtarzalnego

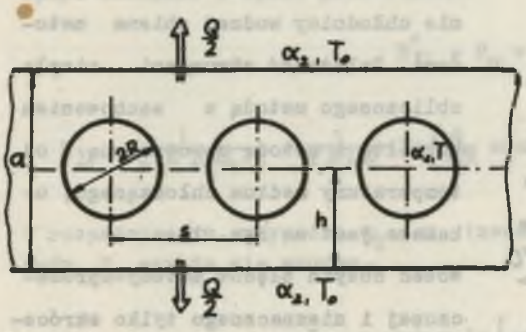
$$\Delta x = \frac{a - r_z}{kk - 11/2 - 0,5},$$

$$\Delta y = \frac{b + c + \delta/2 - r_z}{nn - 1},$$

gdzie kk, nn - liczby podziału odpowiednio wzdłuż osi x i y. Dla zwiększenia dokładności zastosowano przy brzegu elementu powtarzalnego drobniejszy podział.
Obliczeń dokonano na maszynie ZAM-41. Czas obliczeń jednego wariantu ok. 1,5 minuty, przy rozwiązaniu układu 140 równań. Dalsze powiększenie ilości równań nie powodowało dostrzegalnego zwiększenia dokładności obliczeń.

6. PORÓWNANIE WYNIKÓW UZYSKANYCH NA DRODZE OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH I ANALITYCZNYCH DLA CHŁODNICY SYMETRYCZNEJ

W celu sprawdzenia poprawności działania programów i porównania wyników uzyskanych z obu metod z rozwiązaniem analitycznym przeprowadzono odpowiednie obliczenia dla płyty symetrycznej.



Rys. 13. Płyta symetryczna

Zastępczy opór przenikania ciepła wynosi dla tego przypadku

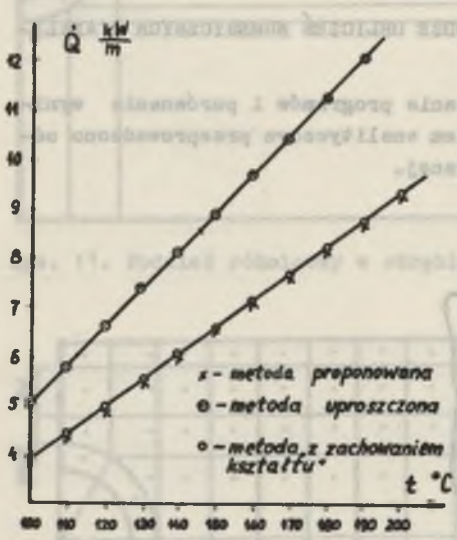
$$R^*_{\Sigma} \cong \frac{1}{2\pi L}\left\{\frac{1}{\alpha_1 R} + \frac{1}{\lambda}\ln\left[\frac{s}{\pi R}\sin h\left(\pi\frac{h + \frac{a}{\alpha_2}}{s}\right)\right]\right\} \tag{10}$$

Wzór ten uzyskano ze wzoru podanego przez Kutateładze [5] metodą warstwy ekwiwalentnej. Metoda ta opisana jest również w [5]. Wzór (10) jest dokładny przy założeniu, że ścianki rury i ścianki zewnętrzne są izotermiczne. Wobec dużych wartości α_1 i α_2 założenie to jest do przyjęcia.
Całkowity strumień ciepła związany jest z tym oporem zależnością

$$\dot{Q} = \frac{T - T_0}{R^*_{\Sigma}} \cdot n \tag{11}$$

Tablica 2

Metoda	Strumień ciepła przejmowanego przez 1 rurę W/m
analityczna	4399,67
"z zachowaniem kształtu"	4482,69
uproszczona	5138,02



Rys. 14. Zależność strumienia ciepła pobranego z pieca od temperatury wody chłodzącej

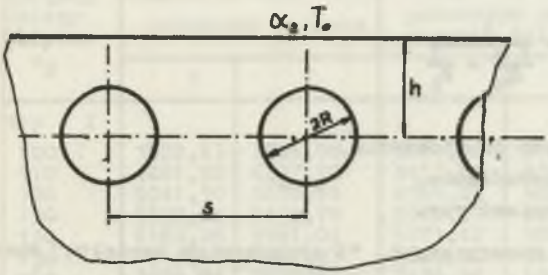
Metoda z "zachowaniem kształtu" okazała się dokładniejszą od metody uproszczonej. Błąd pierwszej z metod wynosi maksymalnie około 3%, podczas gdy druga daje błędy około 19%. Przeprowadzono także obliczenia chłodnicy wodnej obiema metodami. Zależność strumieni ciepła obliczonego metodą z zachowaniem kształtu i metodą uproszczoną od temperatury medium chłodzącego, ukazana jest na rys. 14.

Wobec dużych błędów metody uproszczonej i nieznacznego tylko skrócenia czasu obliczeń zaniechano dalszych obliczeń tą metodą.

7. SPOSÓB OBLICZEŃ CHŁODNICY PŁYTOWEJ

Wobec małej różnicy temperatur między czynnikiem chłodzącym a otoczeniem (10 deg) i dużego oporu przenikania ciepła między medium a otoczeniem, wymianę ciepła w chłodnicy można przedstawić, jak wskazują wyniki obliczeń, (seria ponad 50 wariantów) jako superpozycję dwóch rozwiązań:

- przenikanie ciepła z wnętrza pieca do rzędu rur o tej samej średnicy umieszczonych w ciele półnieskończonym,
- przenikanie ciepła z wnętrza pieca do otoczenia przez wielowarstwową przeponę z otworami.



Rys. 15. Rury w ośrodku półnieskończonym

Rozwiązanie pierwszego z problemów podaje Kutateładze [5]. Zastępczy opór przenikania jest sumą dwóch oporów:
oporu wnikania i oporu przewodzenia

$$R^*_{\Sigma} = R_{\alpha} + R_{\lambda} \tag{12}$$

$$R^*_{\Sigma} = \frac{1}{2\pi L \alpha_1 R} + \frac{1}{2\pi L \lambda} \ln\left[\frac{S}{\pi R} \sinh\left(2\pi \frac{h + \frac{\lambda}{\alpha_2}}{S}\right)\right] \tag{13}$$

W rozpatrywanym przypadku $\alpha_2 = \infty$ (zadana jest temperatura wnętrza pieca). Opór R_{λ} wyraża się wzorem

$$R_{\lambda} = \frac{1}{2\pi L \lambda} \ln\left[\frac{S}{\pi R} \sinh\left(2\pi \frac{h}{2}\right)\right] \tag{14}$$

Wartości oporu R_{λ} podaje tablica 3

Tablica 3

Lp.	Typ chłodnicy	Opór przewodzenia R_{λ} $\frac{m \cdot deg}{w}$
1	wodna	0,014445
2	powietrzna	0,010257
3	powietrzna	0,0097334

Drugi problem rozwiązano zakładając, że wymiana ciepła między wnętrzem pieca a otoczeniem zachodzi według równania

$$\dot{Q} = k\, L\, (T_p - T_o) \cdot n \tag{15}$$

n - ilość rur,
k - zastępczy współczynnik przenikania ciepła opisany wzorem:

$$k = \frac{1}{\frac{2a}{\alpha_o} + \frac{1}{k_N}} \tag{16}$$

α_o - współczynnik wnikania ciepła do otoczenia,
k_N - zastępczy współczynnik przewodzenia,
a - połowa odległości między osiami rur.

Uzyskane na drodze obliczeń numerycznych, "Z zachowaniem kształtu" strumienie ciepła oddanego do otoczenia i odpowiadające im różnice temperatur, posłużyły do obliczenia metodą najmniejszych kwadratów [6] zastępczego współczynnika przenikania ciepła dla każdego z rozważanych typów konstrukcyjnych chłodnic.
Otrzymane wyniki przedstawia tablica 4.

Tablica 4

Lp.	Typ chłodnicy	Zastępczy współczynnik przewodzenia k_N W/m . deg	Średni błąd procentowy %
1	wodna	0,7311	1,75
2	powietrzna	5,0276	0,48
3	powietrzna	3,9867	0,59

8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Obliczenia wykazały, że dla występujących w praktyce wartości temperatur, współczynników wnikania ciepła i wymiarów geometrycznych chłodnice płytowe wielkiego pieca mogą być traktowane z dobrym przybliżeniem jak rząd rur w ośrodku półnieskończonym. Dodatkowo można zwiększyć dokładność obliczeń cieplnych chłodnicy uwzględniając stratę ciepła do otoczenia (patrz p.7). Wymaga to jednak zwykle osobnych obliczeń na EMC.

Porównanie wyników otrzymanych metodą z "zachowaniem kształtu" (kolumny oznaczone liczbą 1) i metodą proponowaną w punkcie 7 (kolumny oznaczone liczbą 2) zawiera tablica 5.

Założenie dwuwymiarowości pola temperatur w chłodnicy jest uzasadnione ze względu na stosowane w praktyce duże prędkości czynnika chłodzącego i niewielkie długości chłodnic. W przypadkach wątpliwych należy z bilansu obliczyć temperaturę czynnika chłodzącego na wylocie z chłodnicy i ewentualnie podzielić tę ostatnią na sekcje.

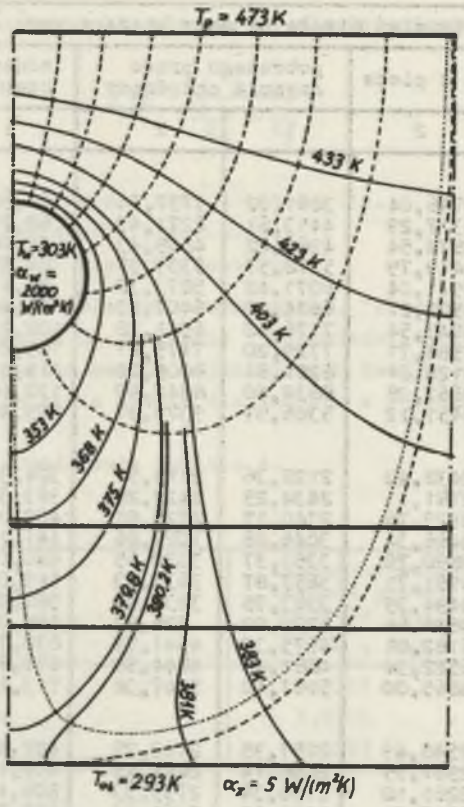
Przedstawiona w pracy metoda obliczeń ma duże znaczenie praktyczne jako, że modele matematyczne chłodnic stanowią część skomplikowanych modeli

Tablica 5

Temper. gorącej ściany chłodn. °C	strumień ciepła na metr bieżący rury W/m					
	pobranego z pieca		pobranego przez czynnik chłodzący		oddanego do otoczenia	
	1	2	1	2	1	2
typ I						
100	3922,43	3796,04	3861,02	3737,56	61,50	58,49
110	4481,90	4337,29	4413,61	4271,49	68,29	65,80
120	5041,30	4878,54	4966,22	4805,43	75,08	73,11
130	5600,68	5419,79	5518,57	5339,37	81,87	80,42
140	6160,06	5961,04	6071,42	5873,30	88,67	87,44
150	6719,47	6502,27	6624,00	6407,23	95,46	95,04
160	7278,84	7043,54	7176,62	6941,18	102,23	102,36
170	7838,24	7584,71	7729,20	7475,11	109,02	109,66
180	8397,62	8126,01	8281,81	8009,05	115,81	116,97
190	8957,00	8667,28	8834,40	8542,99	122,60	124,29
200	9516,41	9451,12	9386,97	9379,97	129,40	131,15
typ II						
100	2452,74	2438,43	2128,36	2119,51	324,38	318,95
110	2797,57	2781,11	2434,25	2422,28	363,32	358,82
120	3142,40	3123,76	2740,17	2725,01	402,24	398,69
130	3487,23	3466,34	3046,06	3027,86	441,12	438,56
140	3832,06	3890,70	3351,97	3330,65	480,09	478,42
150	4186,19	4151,71	3657,87	3633,43	519,02	518,28
160	4521,72	4494,39	3963,78	3936,22	557,94	558,17
170	4866,55	4836,68	4239,00	596,87	598,03	598,03
180	5211,36	5182,01	4575,39	4541,79	635,79	637,89
190	5566,21	5522,34	4881,48	4844,58	674,73	677,76
200	5901,04	5865,00	5187,40	5147,38	713,64	717,63
typ III						
100	2565,76	2548,49	2157,95	2143,28	407,82	402,21
110	2925,27	2901,95	2468,14	2449,46	457,13	452,49
120	3284,75	3281,10	2778,34	2755,33	506,42	502,76
130	3644,26	3617,21	3088,53	3061,84	555,73	553,04
140	4003,74	3971,34	3398,73	3368,02	605,16	603,32
150	4363,25	4327,79	3708,92	3674,21	654,33	654,58
160	4722,76	4684,26	4019,12	3980,39	703,64	703,87
170	5082,28	5039,56	4329,29	4286,57	752,95	754,15
180	5441,75	5397,18	4638,32	4592,76	802,24	804,42
190	5801,23	5753,64	4949,68	4898,94	851,55	854,70
200	6160,74	6110,10	5259,88	5205,12	900,56	904,80

matematycznych procesów cieplnych przebiegających w większych urządzeniach np. w wielkich piecach. Podana prosta i stosunkowo dokładna metoda obliczeń chłodnic płytowych pozwala w takich przypadkach na znaczne skrócenie czasu obliczeń i na racjonalną gospodarkę pamięcią komputera.

Przykładowe pole temperatur (linie ciągłe-izotermy) oraz rozpływ strumieni ciepła (linia przerywana) dla jednego z wariantów przedstawiono na rys. 16. Linia kropkowana rozgranicza strumień ciepła z wnętrza pieca na strumień płynący do otoczenia i do czynnika chłodzącego.



Rys. 16. Przebieg izoterm i strumieni ciepła w wybranym typie chłodnicy płytowej

LITERATURA

[1] ELDERFIELD R.N., COWLING K.W.: Blast Furnace Hearst-the European Way, Ironmaking Proc.Vol 30-4/71, 221-230.

[2] GDULA S.J., MALKIEWICZ T.: Wymiana ciepła w chłodzonym trzonie wielkiego pieca (w druku).

[3] SZARGUT J.: Metody numeryczne w obliczeniach cieplnych pieców przemysłowych (w druku).

[4] MARTIN R.S., WILKINSON J.H.: Solution of Symetric and Unsymetric Band Equations and the Calculations of Einenvectors of Band Matrices, Num. Math. 9, 1967.

[5] KUTAŁADZE S.S.: Osnowy teorii tiepłoobmiena. Izdatielstwo "Nauka",Nowosybirsk, 1970.

[6] Instrukcja eksploatacyjna programu EML-803,Prosynchem. Gliwice.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСТАНОВИВШЕГОСЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ И ПОТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОЭНЕРГИИ В ПЛАСТИНЧАТОМ ХОЛОДИЛЬНИКЕ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Р е з ю м е

В труде проводится простой метод тепловых расчётов избранных вариантов рассматриваемого конструкторского типа подподового пластинчатого холодильника. Разработана универсальная программа на ЭВМ для расчёта произвольного варианта холодильника. Эта программа может применяться для проектирования произвольных пластинчатых холодильников,а также других средств подобной геометрии (напр. нагревательных панелей). Она может применяться для оптимализации геометрических размеров упомянутых средств и материалов,применяемых для их постройки.

DETERMINATION OF STEADY STATE TEMPERATURES FIELD AND HEAT FLOW IN A BLAST FURNACE PLATE COOLER

S u m m a r y

A simple method of calculations of heat transfer for some types of cooling plates has been presented. A universal computer programme was prepared. This programme can be used for designing of a cooling or heating plate and other elements of similar geometry as well as for optimization of their sizes and materials.