ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1990

Seria: INŻYNIERIA ŚRODOWISKA z. 32 Nr kol. 979

Henryk FOIT

MODEL CYFROWY PRZEBIEGU ZMIAN TEMPERATURY POWIETRZA WENTYLACYJNEGO PIERWOTNEGO PRZEPŁYWAJĄCEGO PRZEZ POJEDYNCZY KANAŁ ZAGŁĘBIONY W GRUNCIE

Streszczenie. Przedstawiono model cyfrowy przebiegu zmian temperatury powietrza wentylacyjnego przepływającego przez pojedynczy kanał zagłębiony w gruncie. W celu rozwiązania układu równań różnicowych bilansowania cieplnego elementarnych objętości wykorzystano metodę Exodus. Określono wartość błędu wynikającego z dyskretyzacji przestrzeni i czasu wpływającego na wyniki obliczeń za pomocą przedstawionego modelu cyfrowego.

Spis ważniejszych oznaczeń

a	- współczynnik przewodzenia temperatury	$\frac{m^2}{s}$
d	- średnica kanału	m
c_{pp}	- ciepło właściwe powietrza	$\frac{kJ}{kg}$
c_p	- ciepło właściwe gruntu	$\frac{kJ}{kg}$
$\dot{G}_p$	- natężenie przepływu powietrza	$\frac{kg}{s}$
HKo	- głębokość zanurzenia kanału w gruncie mierzona od powierzchni gruntu do osi kanału	m
HK	- głębokość zanurzenia górnej ścianki kanału prostokątnego	m
HK_1	- wysokość kanału prostokątnego	m
Hwgr	- głębokość położenia zwierciadła wody gruntowej	m
l_c	- całkowita długość odcinka kanału objętego badaniami	m
l	- długość kanału	m
RWA	- promień kanału okrągłego	m
r	- promień	m
S	- powierzchnia wewnętrzna ścianek kanału	m^2
SKA	- odległość między osiami kanałów w płaszczyźnie oraz między płaszczyznami w przypadku dwupłaszczyznowego usytuowania kanałów	m

sks	-	odległość między sąsiadującymi ściankami kanałów dwupiętrzowego usytuowania kanałów	m
skp	-	połowa szerokości kanału prostokątnego	m
t_{ps}	-	temperatura zastępcza powietrza zewnętrznego, uwzględniająca rzeczywistą temperaturę powietrza, wpływ promieniowania słonecznego i odparowanie wilgoci z gruntu	^{o}C
t_p	-	temperatura powietrza zewnętrznego	^{o}C, K
t_{wgr}	-	temperatura wody gruntowej	^{o}C
$\dot{q}$	-	jednostkowy strumień konwekcyjny ciepła	$\frac{W}{m}$
$\delta\dot{Q}$	-	jednostkowy strumień chłodu pobieranego przez jednostkowy strumień powietrza	$\frac{kW}{\frac{kg}{s} \cdot m}$
$-\delta\dot{Q}$	-	jednostkowy strumień ciepła pobieranego przez jednostkowy strumień powietrza	$\frac{kW}{\frac{kg}{s} \cdot m}$
w	-	prędkość średnia przepływu powietrza w kanale	$\frac{m}{s}$
α_k	-	współczynnik konwekcyjnego napływu ciepła do ścianek kanału	$\frac{W}{m^2 K}$
α_{ks}	-	współczynnik konwekcyjnego napływu ciepła do powierzchni gruntu	$\frac{W}{m^2 K}$
β	-	współczynnik geometryczny przepływu dyfuzyjnego pary	
δt	-	zmiana temperatury powietrza przepływającego kanałem	K
ϑ	-	temperatura gruntu	^{o}C
λ	-	współczynnik przewodzenia ciepła przez grunt	$\frac{W}{m\ K}$
λ_p	-	współczynnik przewodzenia ciepła przez powietrze	$\frac{W}{m\ K}$
τ	-	czas	h lub s
τ_p	-	moment uruchomienia instalacji w przypadku pracy okresowej	
τ_k	-	moment wyłączenia instalacji	
ϱ	-	gęstość gruntu	$\frac{kg}{m^3}$
ϱ_w	-	gęstość gruntu wilgotnego	$\frac{kg}{m^3}$

Ω - obszar gruntu przyjęty do badań

ω - obszar wnętrza kanału

ω - prędkość kątowa

1. Wprowadzenie

Powietrze zewnętrzne, na skutek przepływu przez kanał zagłębiony w gruncie, podlega schłodzeniu w okresie lata i podgrzaniu w okresie zimy. Kierunek zmian parametrów powietrza jest zgodny z potrzebami obróbki powietrza dla celów wentylacji i klimatyzacji. Zasadność stosowania takiej obróbki powietrza wentylacyjnego (szczególnie schładzania powietrza latem) powinna wynikać z porównania nakładów inwestycyjnych i eksploatacyjnych instalacji wentylacyjnej, do której przyłączono przeponowy wymiennik gruntowy (układ równoległych poziomych kanałów zagłębionych w gruncie) i instalacji z tradycyjną obróbką powietrza. Nakłady eksploatacyjne instalacji z wymiennikiem gruntowym, obliczone dla okresu żywotności instalacji, zależne są głównie od kosztu zużycia energii na obróbkę i transport powietrza w instalacji. Wyznaczenie kosztu zużytej energii wymaga znajomości efektu obróbki powietrza w przeponowym wymienniku gruntowym. Efekt ten praktycznie ogranicza się do zmian temperatury powietrza przepływającego przez wymiennik. Sposób wyznaczania zmian musi pozostawać w zgodności ze stosowaną metodą określania zużycia energii. Metodą optymalną wyznaczania zużytych energii wydaje się być metoda obliczania zużycia energii dla każdego miesiąca oddzielnie na podstawie charakterystycznego przebiegu dobowego 1 . Jej zastosowanie wiąże się z koniecznością znajomości zmian temperatury jako rozkładów dobowych, charakterystycznych dla poszczególnych miesięcy roku. Jako przebieg roczny parametrów klimatu należy przyjąć, na podstawie wieloletnich pomiarów, średni stan i zmienność parametrów w okresie roku.

W celu wyznaczania wartości zmian temperatury powietrza opracowano odpowiednie modele cyfrowe.

W niniejszym opracowaniu przedstawiono założenia wstępne, model matematyczny oraz model cyfrowy zmian temperatury powietrza przepływającego przez pojedynczy kanał, zagłębiony w gruncie, traktowany jako przypadek najprostszy przeponowego wymiennika gruntowego. W rezultacie porównania wyników uzyskanych za pomocą modelu cyfrowego z wynikami obliczeń za pomocą rozwiązania analitycznego oceniono wartość błędu dyskretyzacji przestrzeni i czasu związanej z modelem cyfrowym.

Wyniki badań za pomocą modelu cyfrowego pojedynczego kanału powinny ułatwić budowę modelu cyfrowego bardziej rozbudowanego wymiennika, składającego się z układu jednakowych, poziomych, równoległych kanałów.

Przeprowadzenie optymalizacji wielkości wymiarowych wymiennika gruntowego wymaga znajomości zmian temperatury powietrza przepływającego przez kanał zagłębiony w gruncie w funkcji: średnicy, długości, głębokości zanurzenia, prędkości przepływu powietrza przez kanał, rodzaju gruntu i usytuowania kanału w grupie kanałów, sposobu działania instalacji wentylacyjnej (całodobowo, okresowo) oraz obecności izolacji cieplnej na powierzchni gruntu.

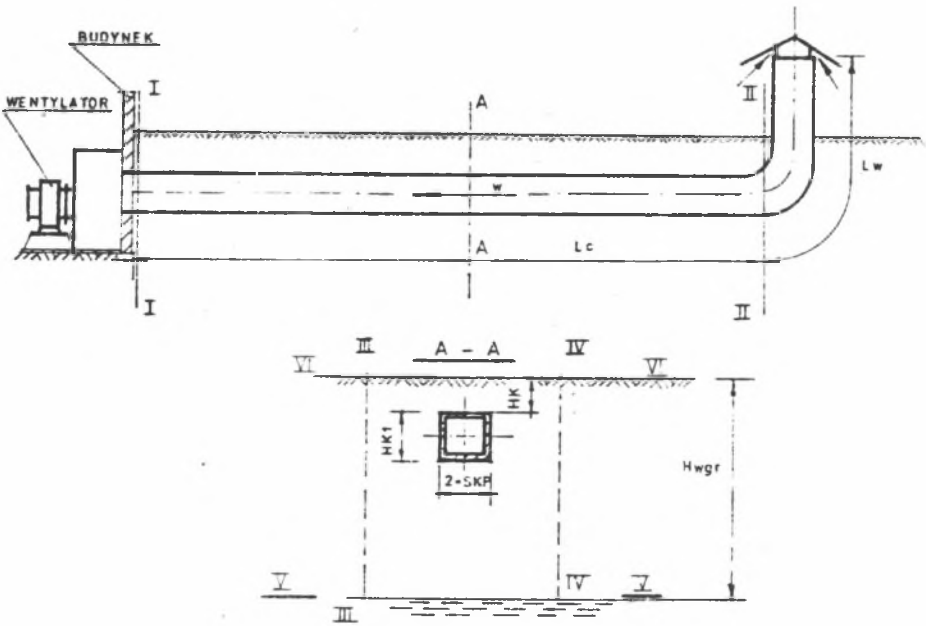
2. Założenia wstępne

W niniejszych rozważaniach ruchu ciepła w układzie powietrze zewnętrzne płynące kanałem - obszar gruntu wokół kanału (rys. 1) przyjmuje się następujące założenia:

- pomija się pionową, wejściową odnogę kanału (praktycznie $\frac{lw}{lc} \approx 0$), do którego doprowadzony jest kanał,
- odcinek kanału objęty badaniami, oznaczony przez lc, ułożony jest poziomo, równolegle do powierzchni terenu, na głębokości HK > 1 m. Kanał może posiadać w przekroju poprzecznym kształt prostokątny lub okrągły,
- ścianki kanału wykonane są z materiału nieprzepuszczalnego dla wilgoci,
- poziom zwierciadła wody gruntowej Hwgr jest niezmienny w ciągu roku i znajduje się na głębokości Hwgr > 7 m. Temperatura gruntu na głębokości Hwgr jest stała w przeciągu roku [2],
- pomijalne są przepływy wody gruntowej w kierunku równoległym do powierzchni terenu,
- powierzchnia terenu o ukształtowaniu poziomu porośnięta jest krótką trawą lub pokryta płytą z materiału nieprzepuszczalnego dla ruchu wilgoci (warstwa bitumiczna lub cementowa). W okresie zimowym powierzchnia ta jest odśnieżana,
- grunt, w którym zanurzony jest kanał, posiada strukturę warstwową (warstwy izotropowe), zgodną z typowymi profilami uwarstwienia gruntu [3], [4],
- na powierzchni gruntu może znajdować się warstwa o dużym oporze cieplnym.

Do badań przyjęto obszar gruntu Ω (rys. 1, 2) o kształcie prostopadłościanu, ograniczonego następującymi powierzchniami:

- pionowymi, prostopadłymi do osi kanału, przechodzącymi przez punkty ograniczające zasadniczą część kanału: (I-I, II-II),
- pionowymi, równoległymi do osi kanału, położonymi w odległości zaniku oddziaływania termicznego kanału (III-III, IV-IV),
- poziomą SZ, pokrywającą się ze zwierciadłem wody gruntowej: (V-V),
- poziomą SP, pokrywającą się z powierzchnią gruntu (VI-VI).

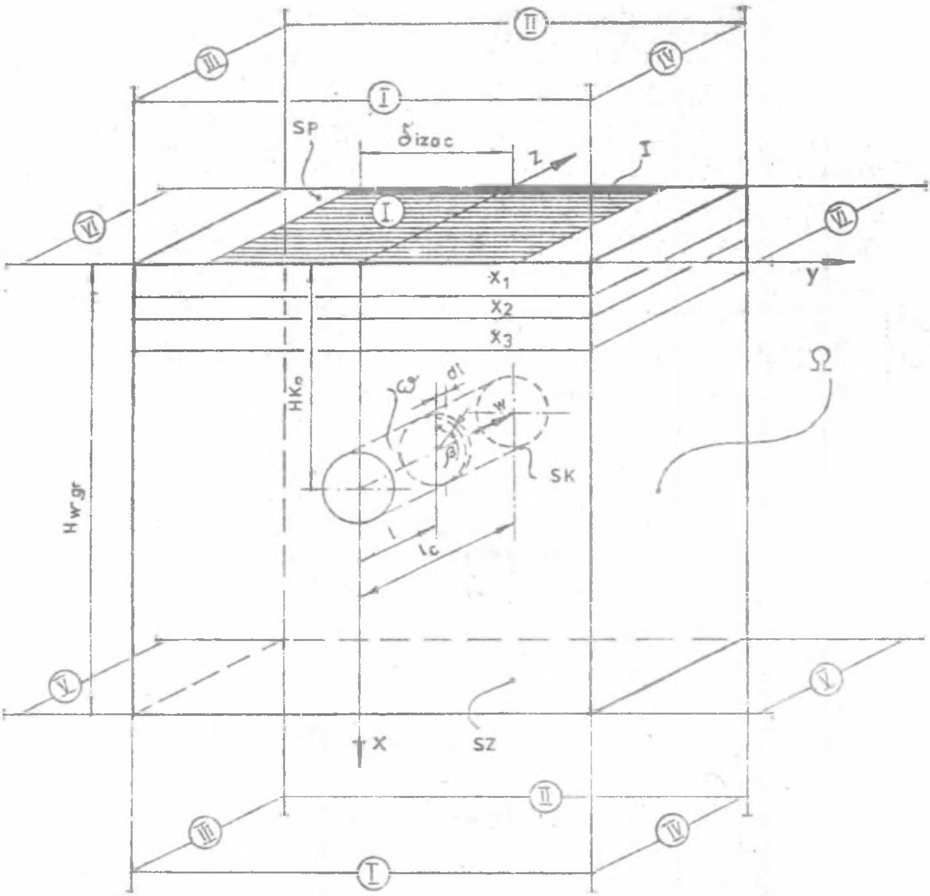


Rys. 1. Usytuowanie podziemnego kanału
Fig. 1. Location of the underground duct

Pionowe powierzchnie ograniczające traktuje się jako adiabatyczne. Założenie adiabatyczności powierzchni: I-I, II-II powoduje ograniczenie obszaru akumulacji ciepła związanej z przepływem powietrza przez kanał w stosunku do rzeczywistego obszaru akumulacji. Przy rozpatrywaniu odpowiednio długich kanałów stosunek obszaru akumulacji ciepła związanej z Ω do rzeczywistego zbliża się do jedności, wobec czego zanika również różnica wartości t: rzeczywistych i obliczonych, wynikająca z adiabatyczności powierzchni I-I, II-II.

W stosunku do przepływającego powietrza przyjmuje się następujące założenia:

- natężenie przepływu powietrza $\dot{G}_p$ przez kanał jest stałe: $\dot{G}_p$ = const,
- powietrze przepływa przez kanał całą dobę lub w pewnym określonym okresie czasu $(\tau_p - \tau_k)$,
- praca instalacji, do której przyłączony jest kanał, obejmuje okres całego roku.



Rys. 2. Obszar geometryczny przyjęty do rozważań
Fig. 2. Assumed geometrical region

3. Analiza czynników warunkujących ruch ciepła kanału między powietrzem przepływającym kanałem zagłębionym w gruncie a gruntem

Przyjęcie modelu matematycznego poprzedzono analizą czynników warunkujących ruch ciepła na drodze: powietrze przepływające kanałem, ścianki kanału, grunt otaczający kanał, atmosfera zewnętrzna. W analizie tej [5] wykorzystano zależności i modele matematyczne oraz zbudowane na ich podstawie modele cyfrowe umożliwiające rozpatrywanie ruchu wilgoci oraz stanu termicznego gruntu związanego z oddziaływaniem klimatu zewnętrznego oraz obecnością kanału w gruncie.

Wnioski wanikające z tej analizy, stanowiące uzupełnienie założeń wstępnych są następujące:

a. zmiany parametrów fizycznych powietrza przepływającego kanałem podziemnym ograniczyć można do zmian temperatury,
b. pomija się wymianę ciepła przez promieniowanie długofalowe wewnątrz kanału,
c. Wewnętrzną powierzchnię ścianek kanału, w przypadku braku przepływu powietrza, traktować można jak adiabatyczną,
d. przyjmuje się, że własności cieplne ścianek kanału są identyczne z właściwościami otaczającego gruntu,
e. w przypadku gruntów ciężkich można zaniedbać przepływy eksfiltracyjne i infiltracyjne oraz ruch wilgoci wynikający z istnienia gradientu temperatury.

Przepływ wilgoci związany z siłami grawitacji, kapilarności i gradientem temperatury może znacząco wpływać na pole temperatury w gruntach o charakterze piaszczystym i żwirowym. Istotne zmiany pola temperatury spowodowane eksfiltracją i infiltracją wody do gruntu lekkiego obejmują najczęściej przypowierzchniową warstwę gruntu o grubości 0,2-0,5 m. W warstwie tej następuje retencjonowanie podstawowej masy wody pochodzącej z opadów deszczu i topnienia śniegu, jedynie ok. 20% masy wody deszczowej infiltruje w głąb gruntu poza warstwę przypowierzchniową. W obszarze gruntu poniżej przypowierzchniowej warstwy zmiany wilgoci nie przekraczają 3-12% maksymalnej zawartości wilgoci. Zmiany te zwiększają się do 40% w warstwie granicznej w miarę zbliżania się do powierzchni gruntu. Średnia zmiana temperatury tej warstwy spowodowana opadami deszczu lub topnieniem śniegu nie przekracza 2 K.
Utwardzenie powierzchni zewnętrznej (takie przypadki przypuszczalnie wystąpią w praktyce najczęściej) znacznie zmniejsza grubość tej warstwy.
W przypadku kanałów umieszczonych w gruntach ciężkich gradient zawartości wilgoci spowodowany gradientem temperatury wokół kanału jest praktycznie równy zero.
Wobec powyższego i przyjętych założeń w dalszych rozważaniach zaniedbuje się uwzględnianie ruchu wilgoci w gruncie. Odpowiada to stosunkowo dobrze rozważaniom ruchu ciepła w gruntach ciężkich - gliniastych, lub dowolnych z utwardzoną, spoistą warstwą powierzchniową i przy spełnionym warunku:

$$hwrk = Hwgr - HK > 3\text{-}7 \text{ m}.$$

W przypadku gruntów lekkich i o dużej porowatości w badaniach przyjmowane będą współczynniki λi c_p odpowiadające zawartości wilgoci równej: WTRW w okresie letnim oraz przeciętnej wilgotności materiału w okresie zimowym. Obliczone dla takich warunków wartości zmian temperatury powietrza przepływającego kanałem wyznaczają dolną granicę zakresu zmian, które mogą pojawić się w rzeczywistości.

f. praktyczny zasięg wahań dobowych temperatury gruntu nie przekracza głębokości 0,3 m. Przy obliczaniu zmian pola temperatury w gruncie poniżej podanej głębokości można posługiwać się wartościami uśrednionymi dobowo,

g. pomija się wymianę ciepła przez promieniowanie długofalowe na drodze: powierzchnia zewnętrzna gruntu - atmosfera,

h. ciepło na transpirację można przyjąć jako równe 1/3 ilości ciepła napływającego do powierzchni gruntu w wyniku promieniowania słonecznego,

i. wobec dużej zgodności rozkładu dobowego promieniowania słonecznego i odparowania można uwzględnić ciepło na transpirację przez przyjęcie w bilansie cieplnym górnej warstewki gruntu równoważnika strumienia promieniowania słonecznego całkowitego i ciepła utajonego równego 2/3 wartości promieniowania całkowitego dla poszczególnych godzin roku,

- ruch ciepła w gruncie opisują formuły przewodzenia, w których λ i c_p przyjmuje się jako wartości odpowiadające średnim zawartościom wilgoci w danej warstwie w okresie roku.

4. Model matematyczny przebiegu zmian temperatury powietrza przepływającego kanałem podziemnym - model I

Do badań przyjmuje się obszar geometryczny , przy czym na części powierzchni S_p ograniczającej prostopadłościan od góry zakłada się możliwość istnienia pasa doskonałej izolacji cieplnej I, o szerokości δizoc; δizoc $\geqslant$ 0 lub δizoc = 0.

4.1. Przebieg zmian temperatury powietrza przepływającego kanałem:

$$\delta t(1,\tau) = \int_0^1 \frac{-\dot{q}(1,\tau)}{\dot{G}_p \quad c_{pp}} \cdot dl \tag{1}$$

4.2. Strumień ciepła $\dot{q}(1,\tau)$ przejmowany na drodze konwekcji:

a. $\dot{G}_p > 0$

$$\dot{q}(1,\tau) = \oint_\beta \alpha_k \left[t(1,\tau) - \vartheta(x,y,1,\tau)\right] \; d\beta \; ;$$

$$\sqrt{(x-HKo)^2 + y^2} = RWA = R \tag{2}$$

przy czym:

$$\begin{cases} t(1,\tau) = t_p(\tau) - \delta t(1,\tau) \\ t(0,\tau) = t_p(\tau) \end{cases} \tag{3}$$

Na powierzchni SK ograniczającej ω: $\sqrt{(x-JKo)^2 + y^2} = RWA = r$ żąda się spełnienia warunku:

$$\alpha_k \left[t(1,\tau) - \vartheta(x,y,1,\tau)\right] = -\lambda \frac{\partial\vartheta(x,y,1,\tau)}{\partial r} \tag{4}$$

Współczynnik α_k przyjmuje się za [6]:

$$\alpha_k = 4,4 \frac{v^{0,75}}{(2r)^{0,25}} \quad \text{dla} \quad Re \geqslant 2320 \tag{5}$$

$$\alpha_k = 5,97 \frac{\lambda p}{(2r)} \quad \text{dla} \quad Re < 2320 \tag{6}$$

Uwzględnienie temperatury powietrza we wzorze (5) może spowodować zmianę wartości współczynnika α_k co najwyżej o 10%.
W przypadku kanałów prostokątnych średnicę (2r) należy zastąpić średnicą hydrauliczną.

b. $\dot{G}_p = 0; \quad \tau_p \leqslant \left[\frac{\tau}{24} - ITN\left(\frac{\tau}{24}\right)\right] \quad 24 < \tau_k$

$$\frac{\partial\vartheta(x,y,1,\tau)}{\partial r} = 0; \quad \sqrt{(x-HK_o)^2 + y^2} = RWA = r \tag{7}$$

4.3. Przewodzenie w obszarze $\Omega - \omega$

Obszar Ω składa się z n warstw poziomych izotropowych:

warstwa 1	$0 \leqslant x < x_1$;	$-y_p \leqslant y \leqslant y_p$;	$0 \leqslant z \leqslant l_c$
warstwa 2	$x_1 \leqslant x < x_2$;	$-y_p \leqslant y \leqslant y$;	$0 \leqslant z \leqslant l_c$
warstwa ε	$x_{\varepsilon-1} \leqslant x < x_\varepsilon$;	$-y_p \leqslant y \leqslant y_p$;	$0 \leqslant z \leqslant l_c$
warstwa n	$x_{n-1} \leqslant x \leqslant x_n$;	$-y_p \leqslant y \leqslant y_p$;	$0 \leqslant z \leqslant l_c$

Przewodzenie ciepła w warstwie ε:

$$\frac{\partial\vartheta}{\partial\tau} c_{p\varepsilon} \varrho_\varepsilon = \lambda_\varepsilon \left(\frac{\partial^2\vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\vartheta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\vartheta}{\partial z^2}\right) \tag{8}$$

Na granicach warstw ε $(2 \leqslant \varepsilon < n)$ żąda się spełnienia warunków:

$$\vartheta(x,y,z,\tau)\Big|_{x_\varepsilon^-} = \vartheta(x,y,z,\tau)\Big|_{x_\varepsilon^+} \tag{9}$$

oraz

$$\lambda_{\varepsilon} \left. \frac{\partial \vartheta(x,y,z,\ )}{\partial x} \right|_{x_{\varepsilon}^{-}} = \lambda_{\varepsilon+1} \left. \frac{\partial \vartheta(x,y,z,\tau)}{\partial x} \right|_{x_{\varepsilon}^{+}} \tag{10}$$

4.4. Warunki brzegowe

a. $x = 0$

a.1. Powierzchnia SP-I: $A(0,y,z,\tau) \in (SP\text{-}I)$:

$$\alpha_{ks} \left[t_{ps}(\tau) - \vartheta(A)\right] = -\lambda_1 \frac{\partial \vartheta(A)}{\partial x} \tag{11}$$

$$_{ks} = A_{os}$$

a.2. Powierzchnia I: $A(o,y,z,\tau) \in I$

$$\frac{\partial \vartheta(A)}{\partial x} = 0 \tag{12}$$

b. $x = Hwgr$

$$\vartheta(Hwgr,y,z,\tau) = twgr = 8^{o}C \tag{13}$$

c. $z = 0$ i $z = l_c$

$$\frac{\partial \vartheta(x,y,z,\tau)}{\partial z} = 0 \tag{14}$$

d. $y = -y_p$ i $y = y_p$

$$\frac{\partial \vartheta(x,y,z,\tau)}{\partial y} = 0 \tag{15}$$

4.5. Warunki czasowe

Przebiegi czasowe $t_{ps}(\tau)$, $t_p(\tau)$, α_{ks} przyjmuje się następująco:

$$t_{ps}(\tau) = A_{os} + A_{1s} \sin(\omega \tau - \varphi_{1s})\ ^{o}C \tag{16}$$

$A_{os} = 9,3^{o}C$; $A_{1s} = 12,9^{o}C$; $\varphi_{1s} = 1,829$

$$t_p(\tau) = A_{oA} + A_{1A} \sin(\omega\tau - \varphi_{1A}) +$$

$$+ (A_{2A} + A_{3A} \sin)\omega\tau - \varphi_{2A}(\sin)365\,\omega\tau - \varphi_{3A})\ ^{o}C \tag{17}$$

$$A_{OA} = 8,2^oC \ ; \quad A_{1A} = 11,7^oC \ ; \quad A_{2A} = 3,4^oC \ ; \quad A_{3A} = 1,7^oC$$

$$\varphi_{1A} = 1,829 \ ; \quad \varphi_{2A} = 1,829 \ ; \quad \varphi_{3A} = 2,3562$$

$$\alpha_{ks} = A_o \qquad \left[\frac{W}{m^2\ {}^oK}\right] \tag{18}$$

$$A_o = 15,5$$

$$\omega = \frac{2\pi}{8760}$$

Do rozważań przyjęto również przebiegi $t_{ps}(\tau)$ i $t_p(\tau)$ odpowiadające przeciętnym ekstremalnym stanom klimatu zewnętrznego. Ekstremum okresu letniego związane było z następującymi wartościami:

$$A_{os} = 11,3^oC \ ; \quad A_{1s} = 15^oC$$

$$A_{OA} + 10,2^oC \ ; \quad A_{1A} = 13,9^oC$$

a zimowego

$$A_{os} = 8,3^oC \ ; \quad A_{1A} = 16,8^oC$$

$$A_{OA} = 7,0^oC \ ; \quad A_{1A} = 16,3^oC$$

Jako doby reprezentatywne przyjęto dni z numerem 15 dla kolejnych miesięcy roku.
Czas τ w godzinach liczony był od godziny 0^{00}, 1 stycznia, po wystarczająco dużej ilości (m) realizacji cykli.

$$m\,(2\pi) + \frac{2\pi}{8760} \quad 0 < \frac{2\pi\tau}{8760} \leqslant m(2\pi) + \frac{2\pi}{8760} \quad 8760 \tag{19}$$

Z okresowością funkcji: $t_{ps}(\tau)$ i $t_p(\tau)$ wiąże się istnienie okresowości funkcji $\vartheta(A,\tau)$, $A\in(\Omega - \omega\text{-}SZ)$.
Pociąga to za sobą eliminację warunków początkowych.

Ze względu na symetrię układu płaszczyzny $y = 0$ do dalszych rozważań przyjmuje się część obszaru $\Omega' \in \Omega$ spełniającą warunek $0 \leqslant y \leqslant y_p$. Na płaszczyźnie $y = 0$ ograniczającej Ω' spełniony jest warunek:

$$\frac{\partial\vartheta(x,y,z,\tau)}{\partial y} = 0 \ . \tag{20}$$

5. Model cyfrowy przebiegu zmian temperatury $\delta t(1,\tau)$ powietrze płynącego kanałem podziemnym - I

Zgodnie z wcześniej przedstawionym celem pracy obliczenia zmierzają do wyznaczenia przebiegu zmian $\delta t(1,\tau)$ dla dwunastu dni, odległych od siebie czasowo o jeden miesiąc.
Określenie funkcji $\delta t(1,\tau)$ wymaga znajomości funkcji $\vartheta(x,y,z\tau)$. W celu wyznaczenia $\vartheta(x,y,z,\tau)$ na powierzchni $\sqrt{x^2 + y^2} = RWA$ wykorzystano metodę różnic skończonych z krokiem czasowym w przód. Odpowiednie równanie różnicowe otrzymano przez sporządzenie bilansów dla elementów różnicowych dyskretnej czasoprzestrzeni związanej z rozpatrywanym okresem czasu i obszarem: $\Omega' - \omega$.
Wśród sposobów rozwiązywania równań różniczkowych opisujących nieustalone przewodzenie ciepła opartych na metodzie ilorazu różnicowego przedniego [7]- [10] do ostatecznej analizy wybrano: metodę kolejnych przybliżeń oraz Exodus. Uzasadnienie takiego wyboru tkwi w możliwości posługiwania się w trakcie obliczeń za pomocą tych metod jedynie dwiema powierzchniami, odpowiadającymi dwóm kolejnym rozkładom czasowym temperatur, z dyskretnej czasoprzestrzeni rozkładu temperatur. Ogranicza to w sposób istotny wymagany do realizacji obliczeń obszar pamięci maszyny cyfrowej.

Metoda kolejnych przybliżeń, pierwsza z wybranych, polega na wyznaczaniu kolejno dla poszczególnych punktów czasowych (dni lub godzin) rozkładów temperatury we wszystkich punktach węzłowych dyskretnej przestrzeni $(\Omega' - \omega)$ na podstawie założonego rozkładu startowego, rozpoczynając od 1 stycznia. Obliczony rozkład dla ostatniego dnia roku staje się rozkładem startowym dla kolejnego kroku iteracyjnego obliczeń. Wyznaczony rozkład temperatur uważa się za satysfacjonujący, jeśli bezwzględne różnice wartości temperatur odpowiadających sobie rozkładów uzyskanych w dwóch kolejnych krokach iteracyjnych są mniejsze od pewnej - z góry zadanej, odpowiednio małej - dodatniej wielkości ε.

Celem obliczeń, jak wspomniano wcześniej, jest wyznaczenie rozkładów $\delta t(1,\tau)$ dla dwunastu dni odległych od siebie czasowo o jeden miesiąc. Przebiegi $\delta t(1,\tau)$, w określanych dwunastu dniach, wyznacza się z częstością: co jedną godzinę. Przyjęcie takiego kroku czasowego w obliczeniach wiąże się z koniecznością wyznaczanie wartości temperatur w rozważanym dyskretnym obszarze przestrzennym dla 8760 punktów czasowych w ramach jednego kroku iteracyjnego. W celu zmniejszenia liczby punktów czasowych przyjmuje się zmienny krok czasowy wg następującej zasady: w dniu, w którym wyznacza się rozkład $\delta t(1,\tau)$ oraz w pięciu dniach poprzedzających stosuje się krok czasowy $\Delta\tau = 1h$, a w pozostałych odcinkach czasu $\Delta\tau = 24$ h. W ten sposób w okresie roku otrzymuje się: $n_\tau = 2021$ kroków czasowych. Zmiana kroku czasowego wymaga przekształcenia przestrzennej siatki dyskretyzacji w związku z koniecznością spełnienia warunku ograniczającego wartość kroku przestrzennego przy danej wartości kroku czasowego. Wartości temperatur w nowych węzłach "gęstszej" sieci przestrzennej, przy przekształceniu $\Delta\tau = 24$ h $\rightarrow \Delta\tau = 1$ h, wyznacza się za pomocą wielomianów interpolacyjnych, na podstawie wartości temperatur w węzłach przed zmianą siatki przestrzennej. Przy przekształceniu $\Delta\tau = 1$ h $\rightarrow \Delta\tau = 24$ h nową siatkę przestrzenną przyjmuje się tak, że węzły tej siatki pokrywają się z wybranymi węzłami poprzedniej siatki.

W ramach niniejszej pracy opracowano wstępnie program na EMC realizujący obliczenia wg schematu przedstawionego powyżej. Ostatecznie jednak, ze względu na zalety metod probabilistycznych, do opracowania modelu wybrano metodę Exodus.

Podstawową zaletą metod probabilistycznych jest możliwość wyznaczania temperatury w pewnych punktach dyskretnego obszaru czasoprzestrzeni (temperatury w wybranych punktach ścianek kanału) bez potrzeby wyznaczania temperatur we wszystkich punktach dyskretnych czasoprzestrzeni. W przypadku niezmienności czasowej współczynników związanych z ruchem ciepła (α_{ks}, α_k, a) oraz okresowości temperatur brzegowych współczynniki rozkładu czasowego temperatury w danym punkcie można wykorzystywać do obliczania temperatury w dowolnym momencie czasowym rozpatrywanego okresu czasu. Wiąże się z tym możliwość znacznego zmniejszenia czasu obliczeń.

5.1. Ogólne dane dotyczące przyjętej metody rozwiązania modelu I

Funkcje $\vartheta(x,y,l\tau) = \vartheta(s,\tau)$ można, pamiętając o okresowości rozważanego pola temperatur i związanym z nią zanikiem warunków początkowych, zapisać w postaci:

$$\vartheta(x,y,l\tau) = \lim_{\tau_{N}\rightarrow\infty} \left[\lim_{\Delta \bar{l} \rightarrow 0} \sum_{\bar{\tau}=\tau}^{\bar{\tau}=\tau_N} \sum_{\bar{l}=1}^{\bar{l}=\frac{lc}{\Delta \bar{l}}} R1(S,\bar{l},\bar{\tau})\ t(l,\tau-\bar{\tau}) + \right.$$

$$\left. \sum_{\tau'=\tau}^{\tau'=\tau_N} R2(S,\bar{\tau})\ t_{ps}(\tau-\bar{\tau}+P11(S)\ twgr \right] \qquad (21)$$

R1, R2, P11 są ogólnie funkcjami: wielkości geometrycznych określających długość, średnicę, zagłębienie kanału, Hwgr, δ izoc, własności gruntu, ilości przepływającego powietrza, α_{ks}. Współczynniki R1, R2, P11 określone zostaną, zgodnie z metodą Exodus, przez obserwację w rozpatrywanym obszarze przestrzennym $(\Omega'-\omega)$ i czasie dużej ilości (10000) cząstek błądzących rozpoczynających swój ruch w punkcie (S) i czasie τ. Obserwację, w trakcie której rejestruje się za pomocą liczników $R1(S,\tau,\bar{\tau})$, $R2(S,\bar{\tau})$, P11(S) względną "liczbę" cząstek docierających do brzegu SK, składającego się z τ jednakowych walców o długości Δl oraz brzegów SP, SZ w chwili $\bar{\tau}$, przeprowadza się praktycznie do momentu τ_N pochłonięcia prawie wszystkich cząstek, czego odzwierciedleniem jest spełnienie warunku:

$$1 - (R1 + R2 + P11) \leqslant 0{,}01 \tag{22}$$

Wielkości R1, R2, P11 dla $\dot{G}_p > 0$ są niezależne od warunków początkowych, wobec czego wyznaczone raz w postaci ogólnej mogą służyć do obliczania $\vartheta(S,\tau)$ dla dowolnego τ. W przypadku wentylacji okresowej konieczne jest wyznaczenie R1, R2, P11, dla poszczególnych τ spełniających warunek: $\tau_p \leqslant \tau \leqslant \tau_k$. Rozprzestrzenianie się cząstek odbywa się analogicznie do rozpływu ciepła. W dyskretnej czasoprzestrzeni trójwymiarowej przekazywanie cząstek z rozpatrywanego punktu przestrzennego (S) i czasowego ($\bar{\tau}$) do sąsiednich punktów przestrzennych i czasowego ($\bar{\tau}-1$) następuje zgodnie z wartościami współczynników określających "rozpływ" ciepła: R6, R7, R8, R9 oraz R5.
Wyznaczenie R6, R7, R8, R9 i R5 wymaga przeprowadzenia dyskretyzacji czasu i przestrzeni.

5.2. Dyskretyzacja przestrzeni

Wyznaczenie temperatury ścianki, zgodnie ze wzorem (1) wymaga znajomości temperatury powietrza w kanale $t(l,\tau)$; $0 \leqslant l \leqslant l_c$, będącej funkcją nieznanych zmian $\delta\, t(l,\tau)$ - wzór (3). Wobec tego określenie dokładnych wartości $\delta\, t(l,\tau)$ i $t(l,\tau)$ wiąże się z koniecznością zastosowania metody kolejnych przybliżeń. Ponieważ jednak:

$$\left[\frac{\partial\vartheta(x,y,z,\tau)}{\partial x}\ \mathrm{i}\ \frac{\partial\vartheta(x,y,z,\tau)}{\partial y}\right] \gg \frac{\partial\vartheta(x,y,z,\tau)}{\partial z}$$

oraz wartości $t(l+\Delta l,\tau)$ i $t(l,\tau)$ różnią się nieznacznie dla odpowiednio małych Δl, wobec czego zmiany temperatury powietrza przepływającego przez kanał można obliczać w sposób przybliżony poprzez sumowanie wartości zmian dla odpowiednio małych odcinków kanału Δl.
W tym celu obszar Ω' zostanie podzielony płaszczyznami $z = n\,\Delta l$ na k identycznych warstw o szerokości Δl. Równanie (1) zostanie zastąpione wówczas następującym:

$$\delta t(l_c,\tau) = \Delta t_c(\tau) = \sum_{n=1}^{n=\frac{lc}{\Delta l}} \frac{-\dot{q}^n_{\Delta l}(\tau)}{\dot{G}_p\ c_{pp}}\,\Delta l = \sum_{n=1}^{n=k} \Delta t^n(\tau)\ , \tag{23}$$

przy czym $\dot{q}^n_{l}(\tau)$ jest ilością ciepła wymienionego między powietrzem płynącym kanałem a ściankami w odcinku n kanału o długości Δl. Powierzchnie ograniczające warstwę n traktowane są jako adiabatyczne, natomiast temperatura powietrza przepływającego przez odcinek n kanału $(t(l,\tau))$ oraz izotermy wewnątrz warstwy spełniają warunki:

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial t(l,\tau)}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial \vartheta(x,y,z,\tau)}{\partial z} &= 0 \end{aligned}\right] \tag{24}$$

Zmiana temperatury $t(l,\tau)$ o wartość $\Delta t^n(\tau)$ następuje skokowo w punkcie kończącym rozpatrywany odcinek n:

$$t(l,\tau) = t^n(\tau) = t_p(\tau) + \sum_{n=1}^{n'=n-1} \Delta t^n(\tau) \quad \text{dla} \quad n > 1 \tag{25}$$

oraz

$$t^n(\tau) = t_p(\tau) \quad \text{dla} \quad n = 1 \tag{26}$$

Wobec powyższego układ przestrzenny (x,y,z) można wewnątrz warstwy zastąpić układem dwuwymiarowym (x,y), a $R1(S, \bar{I}\,\tau) = R1(x,y,\tau)$, $R2(S,\tau) = R2(x,y,\tau)$, $P11(S) = P11(x,y)$. Wówczas współczynniki R1, R2, P11 nie zależą od numeru rozpatrywanej warstwy n. Dalszy podział obszaru $\Omega' - \omega$ płaszczyznami $x = x_i$ oraz $y = y_i$ prowadzi do wyznaczenia punktów węzłowych siatki dyskretyzacji (i, j).
Płaszczyzny te prowadzone są zgodnie z następującymi zasadami:

- największe zagęszczenie płaszczyzn występuje w obszarze, gdzie przewiduje się istnienie silnych gradientów temperatury: w pobliżu kanału ω, płaszczyzny granicznej SP oraz krawędzą pasa izolacji I,
- odległości między płaszczyznami, pomijając obszary związane z płaszczyzną SP oraz krawędzią izolacji I, zmieniają się proporcjonalnie do odległości od kanału,
- każda warstwa δ zostaje podzielona na całkowitą ilość podwarstw,
- żadna z płaszczyzn w pobliżu kanału ω nie jest styczna do ścianek kanału (warunek wynika z konieczności spełnienia nierówności (44)),
- wszystkie płaszczyzny $x = x_i$, zawierające punkty węzłowe, dla których przeprowadza się bilansowanie, prowadzi się wewnątrz obszaru Ω' (wynika z warunku (44) oraz warunku brzegowego (11)).

Wówczas równanie (23) dla prostokątnego przekroju kanału można przedstawić w postaci:

$$\Delta t_n(\tau) = \frac{-2 \quad \Delta l}{\dot{G}_p \quad c_{pp}} \left\{ \sum_{j=2}^{j=h_1-1} \left[t^n(\tau) - \vartheta^n(a_1,j,\tau)\right] R_3' + \right.$$

$$+ \sum_{j=2}^{j=h_1-1} \left[t^n(\tau) - \vartheta^n(b_1,j,\tau)\right] R_A' +$$

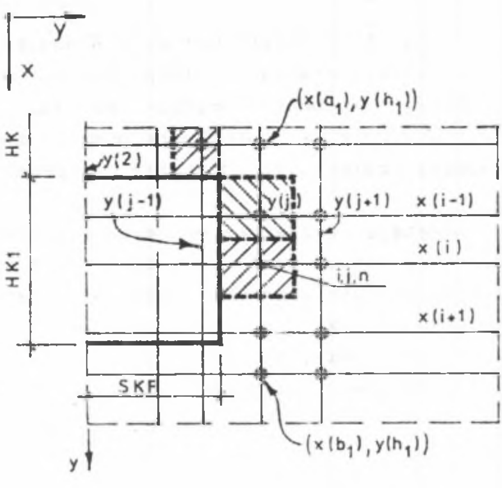
$$\left. + \sum_{i=a_1-1}^{i=b_1-1} \left[t^n(\tau) - \vartheta^n(i,h_1,\tau)\right] R_3' \right\}, \tag{27}$$

gdzie:

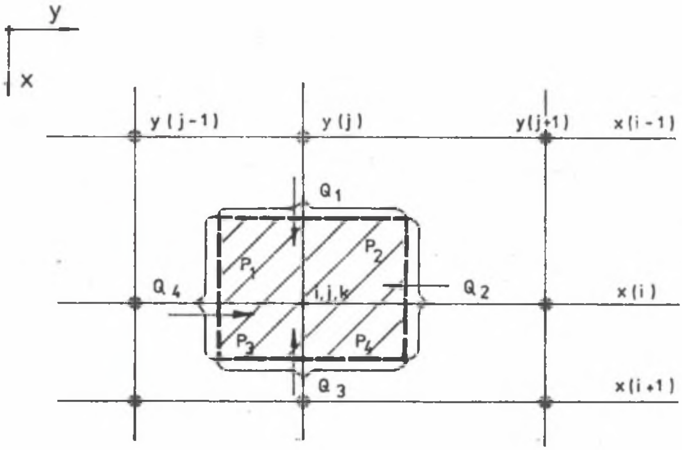
a_1, b_1, h_1 - wg rysunku 3,

natomiast:

R_A', R_B', R_3' - są oporami przepływu ciepła związanymi z różnicami temperatur $(t^n - \vartheta^n)$, pomnożonymi przez odpowiednie powierzchnie przepływu ciepła.



Rys. 3. Dyskretny element objętości położony na granicy ścianek kanału
Fig. 3. Discrete element of the volume placed on the border of the duct walls



Rys. 4. Dyskretny element objętości położony wewnątrz rozpatrywanego obszaru gruntu

Fig. 4. Discrete element of the volume placed inside the considered ground region

Bilansowanie cieplne elementarnych objętości wewnętrznych obszaru $\Omega' - \omega$ w przedziale czasu: $\tau - \tau + \Delta\tau$, wobec występującej w warunkach rzeczywistych ciągłości zmian oraz niewielkiego zróżnicowania własności cieplnych sąsiadujących warstw gruntu, prowadzi do równań zastępujących: [8]- [10]. Dla objętości (i,j,n) otrzymuje się:

$$\vartheta^n(i,j,\tau+\Delta\tau) = \vartheta^n(i,j,\tau)+\Delta\tau\Big\{\big[\vartheta^n(i-1,j,\tau)-\vartheta^n(i,j,\tau)\big]\ R_A +$$
$$+\big[\vartheta^n(i+1,j,\tau)-\vartheta^n(i,j,\tau)\big]\ R_B+\big[\vartheta^n(i,j-1,\tau)-\vartheta^n(i,j,\tau)\big]\ R_3 +$$
$$+\big[\vartheta^n(i,j+1,\tau)-\vartheta^n(i,j,\tau)\big]\ R_4\Big\}\ /(V_1+V_2+V_3+V_4) =$$
$$= \vartheta^n(i,j,\tau)\ R_5+\vartheta^n(i-1,j,\tau)\ R_6+\vartheta^n(i+1,j,\tau)\ R_7 +$$
$$+\vartheta^n(i,j,\tau)\ R_8+\vartheta^n(i,j+1,\tau)\ R_9\ . \tag{28}$$

gdzie:

R_A, R_B, R_3, R_4 – są oporami przepływu ciepła pomnożonymi przez odpowiednie powierzchnie przepływu ciepła związanymi ze strumieniami $\dot{Q}_1$, $\dot{Q}_2$, $\dot{Q}_3$, $\dot{Q}_4$ – rys. 4

P1, P2, P3, P4 – składowe elementarnej objętości – rys. 4.

Dla elementarnych objętości przylegających do powierzchni ograniczających rozpatrywany obszar $\Omega - \omega$ równanie należy zmodyfikować, zgodnie z odpowiednimi warunkami granicznymi.

Powierzchnia ścianek kanału

Dla elementarnej objętości (i,j,n), np. przylegającej do pionowej ścianki kanału (rys. 3) w równaniu (28) należy przyjąć:

$$V_1 = x_2(y)j(-\ SKP)\quad 0,5\ c_p(i)\,\varrho(i) \tag{29}$$

$$V_4 = x_3(y)j(-\ SKP)\quad 0,5\ c_p(i+1)\,\varrho(i+1) \tag{30}$$

a. $\dot{G}_p > 0$

$R_A = R_A$ (31)

b. $\dot{G}_p = 0$

$R_A = 0$ (32)

Płaszczyzna $y = 0$

$j = 2$

$$\vartheta^n(i,j,\tau+\Delta\tau) = \vartheta^n(i,j,\tau)\ R_5 + \vartheta^n(i-1,j,\tau)\ R_6 +$$

$$+ \vartheta^n(i+1,j,\tau)\ R_7 + \vartheta^n(i,j-1,\tau)\ R_8 + \vartheta^n(i,j+1,\tau)\ R_9 \tag{33}$$

Warunek (15)

Niech:

$$y(1) = 0 \tag{34}$$

oraz

$$y(2) - y(1) > 0$$

$$y(2) - y(1) \ll y(3) - y(2) \tag{35}$$

Wówczas dla węzła (i, 2), wykorzystując warunek (15), można napisać:

$$\vartheta^n(i,2\tau+\Delta\tau) = \vartheta^n(i,2,\tau)\ R_5 + \vartheta^n(i-1,2,\tau)\ R_6 +$$

$$+ \vartheta^n(i+1,2,\tau)\ R_7 + \vartheta^n(i,3,\tau)\ R_9 \tag{36}$$

Równanie (36) przyjmuje się również w przypadku:

$$y(2) = 0 \tag{37}$$

Z (36) wynika:

$$R_8 = 0 \quad ; \quad R_3 = 0 \tag{38}$$

Płaszczyzna $y = y_p$

$$R_4 = 0 \tag{39}$$

Płaszczyzna $x = 0$

$$V_2 + V_3 = x(2)\left[y(j+1) - y(j-1)\right] 0{,}25\varrho(2) \quad c_p(2) \tag{40}$$

a. płat izolacji I

$$R_A = 0 \tag{41}$$

b. powierzchnia poza I

$$R_A = \left[\frac{1}{\alpha_{ks}} + \frac{\lambda(2)}{x(2)}\right]\left[y(j+1) - y(j-1)\right] 0{,}5 \tag{42}$$

Płaszczyzna $x = Hwgr$

$$V_3 + V_4 = \left[x(i)-x(i-1)\right]\left[y(j+1)-y(j-1)\right] 0{,}25 \; c_p(i+1/ \; \varrho(i+1) \tag{43}$$

W przyjętej metodzie ilorazu różnicowego najpierw $\Delta\tau$ musi w każdym węźle spełniać warunek:

$$0 < \Delta\tau \quad \Delta\tau_m \, . \tag{44}$$

gdzie: $\Delta\tau_m$ oznacza taką wartość kroku czasowego różnego od zera, dla którego spełniona jest równość:

$$\vartheta^n(i,j,\tau+\Delta\tau) = \vartheta^n(i,j,\tau) \tag{45}$$

Z (28) wynika:

$$\vartheta^n(i,j,\tau) = \vartheta^n(i,j,\tau+\Delta\tau) =$$

$$= \frac{\vartheta^n(i-1,j,\tau)\; R_A + \vartheta^n(i+1,j,\tau)\; R_B + \vartheta^n(i,j-1\tau)\; R_3 + \vartheta^n(i,j+1,\tau)\; R_4}{R_A + R_B + R_3 + R_4} \tag{46}$$

oraz

$$\vartheta^n(i,j,\tau) = \vartheta^n(i,j,\tau)\;(1-\Delta\tau_m \frac{R_A + R_B + R_3 + R_4}{\sum V}) +$$

$$+\Delta\tau_m\ (\vartheta^n(i-1,j,\tau)\ R_A+\vartheta^n(i+1,j,\tau)\ R_B+\vartheta^n(i,j-1,\tau)\ R_3\ +$$

$$+\vartheta^n(i,j+1,\tau)\ R_4) : \sum V \qquad (47)$$

Powyższy układ równań prowadzi do zależności:

$$\Delta\tau_m = \frac{\sum V}{R_A + R_B + R_3 + R_4} \qquad (48)$$

Nierówność (44) jest warunkiem wystarczającym do istnienia zbieżności do zera wyrażeń R_1, R_2, P_{11} przy $\bar{\tau} \to \infty$, a ponieważ $(t_{ps}(\tau-\bar{\tau}),\ t^n(\tau-\bar{\tau})$, twgr $< tp_{smax}$, wobec czego (44) jest warunkiem wystarczającym do zbieżności wyrażenia (21).

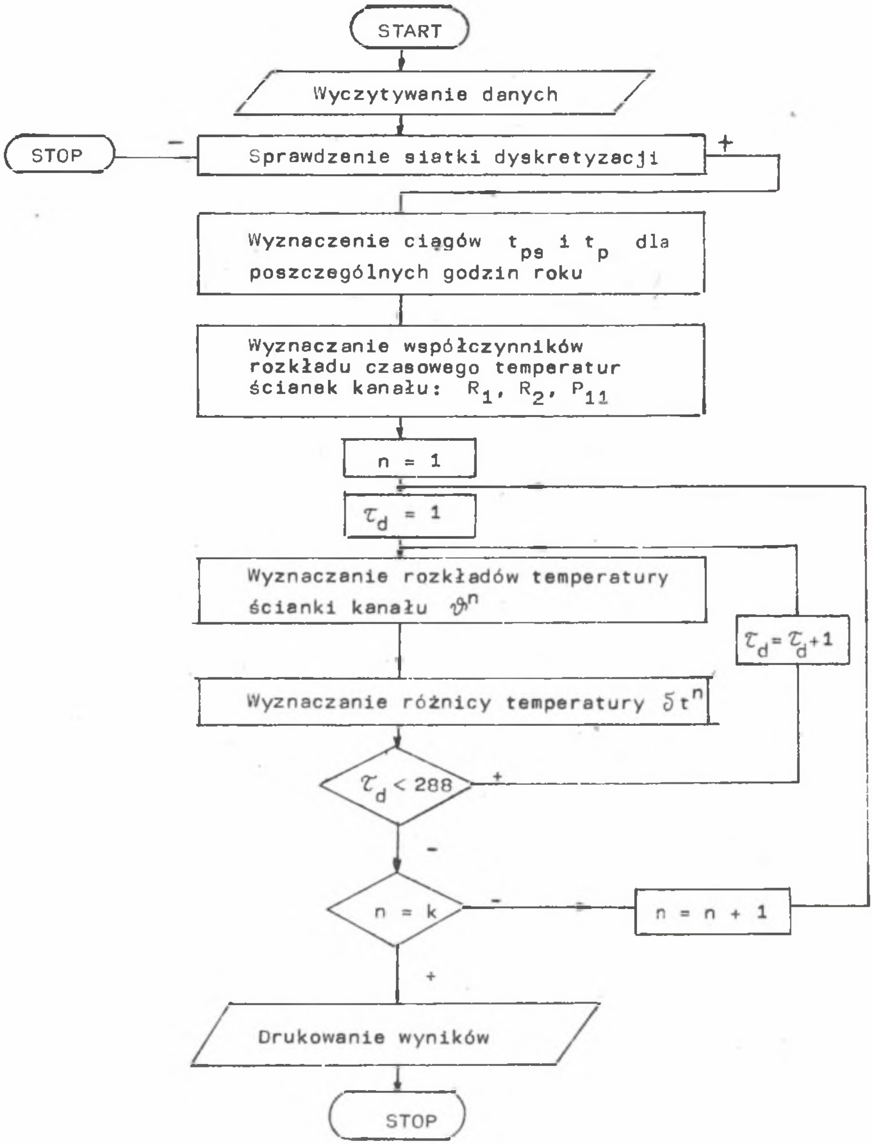
5.3. Dyskretyzacja czasu

Ograniczeniem wartości $\Delta\tau$ od dołu jest maksymalna częstość wykonywania pomiarów przez stacje meteorologiczne, których wyniki stanowią bazę danych wejściowych do obliczeń. Pomiary te wykonywane są z częstością nie mniejszą niż 1 godzina. Ograniczenie wartości $\Delta\tau$ od góry związane jest ze spełnieniem warunku (44).
Jako wartość podstawową kroku czasowego w obliczeniach przyjmuje się $\Delta\tau = 1$ h. Taka wartość $\Delta\tau$ wiąże się jednak z koniecznością stosowania dużych tablic pozwalających zapisać ciągi wartości: temperatury powietrza zewnętrznego, temperatury "zastępczej" dla okresu całego roku, tj. 8760 punktów czasowych.
W celu zmniejszenia wymiarów tablic w obliczeniach uwzględnia się:

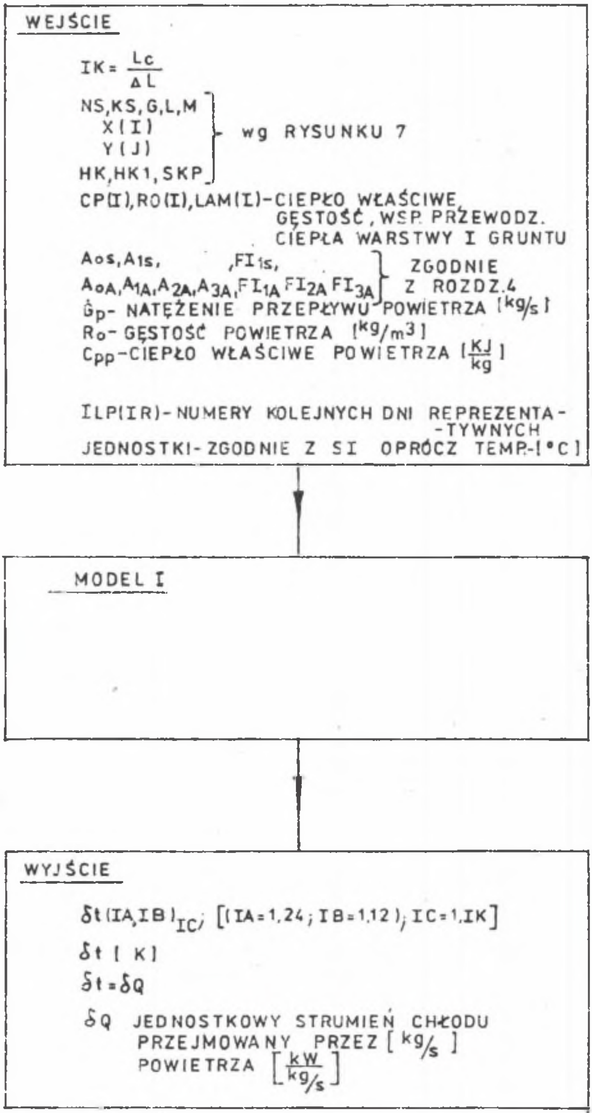
- ciągi wartości średniodobowych temperatury "zastępczej" - na podstawie 3 oraz wniosków z badań poligonowych,
- ciągi wartości średniodobowych temperatury powietrza zewnętrznego uzupełnione dwunastoma odcinkami, z których każdy zawiera wartości cogodzinne temperatury dnia, dla którego przeprowadza się obliczenia oraz pięciu dni poprzedzających rozpatrywaną dobę.

Obliczenia funkcji $R_1(S,\bar{\tau})$, $R_2(S,\bar{\tau})$, P11 przeprowadza się przy użyciu kroku $\Delta\tau = 1$ h, jednak argumentami funkcji R_1 i R_2 są:

- dla $\tau-\bar{\tau} \leq 120$ - wartości cogodzinne temperatury.
  W przypadku temperatury zastępczej przyjmuje się wartości cogodzinne równe wartościom średniodobowym dla danej doby związanej z $\tau - \tau$; $\Delta\tau = 1$ h.
- dla $\tau-\bar{\tau} > 120$ h - wartości średniodobowe; $\Delta\tau = 24$ h.



Rys. 5. Uproszczony schemat blokowy modelu cyfrowego I
Fig. 5. Simplified block diagram of the numerical model I



Rys. 6. Dane wejściowe i wielkości wyjściowe z modelu I
Fig. 6. Input data and outlet quantities for the model I

Zmiany temperatury $\Delta t^{n}(\tau)$ wyznaczane będą dla 12 dni charakterystycznych, odległych od siebie czasowo o jeden miesiąc. Konieczne dla wyznaczenia temperatur ścianek kanału wg (21) wartości $\Delta t^{n-1}(\tau-\bar{\tau})$, w okresie miesiąca między kolejnymi dniami charakterystycznymi, określane będą przez interpolację liniową znanych dla tych dni wartości $\Delta t^{n-1}(\tau-\bar{\tau})$.
Wartości średniodobowe dla $\tau - \bar{\tau} > 120$ oblicza się przez uśrednione arytmetyczne wartości cogodzinnych dla danej doby.

Na podstawie wyprowadzonych zależności zbudowano algorytm (rys. 5) programu na EMC "ODRA 1305" do obliczania wartości zmian temperatury powietrza przepływającego kanałem o przekroju prostokątnym zagłębionym w gruncie. Szczegółowy zestaw wielkości wejściowych i wyjściowych z programu przedstawiono na rys. 6.

6. Błędy dyskretyzacji oraz porównanie wyników uzyskanych za pomocą modelu I i rozwiązania analitycznego dla pojedynczego kanału okrągłego w obszarze nieskończonym

6.1. Wpływ gęstości węzłów dyskretyzacji płaszczyzny xy na błędy obliczeń

W celu oceny wpływu gęstości węzłów dyskretyzacji płaszczyzny xy na błędy obliczeń dokonano dwukrotnie obliczenia $\Delta t_c(\tau)$, posługując się siatkami różniącymi się dwukrotnym stopniem zagęszczenia węzłów w pobliżu ścianek kanału, przy zachowaniu identyczności wszystkich pozostałych warunków. Siatkę o większej gęstości węzłów przedstawiono na rys. 7. Wyniki obliczeń, dla dwóch wybranych dni, przedstawiono na rys. 8. Różnica bezwzględnych wartości $\Delta t_c(\tau)$ nie przekracza $\Delta t = 0,1^{o}C$. Współczynnik korelacji liniowej wynosi 0,98.

6.2. Błędy dyskretyzacji

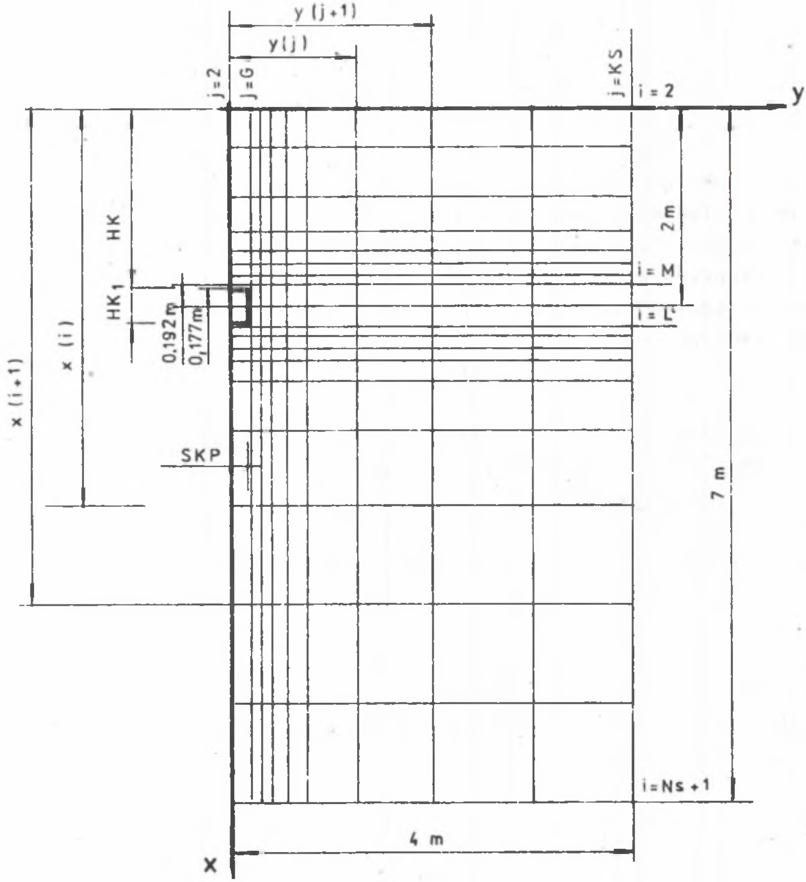
W celu określenia przybliżonej wartości błędów dyskretyzacji przestrzeni i czasu stosowanej w modelu cyfrowym dokonano porównania wyników obliczeń $\Delta t_c(\tau)$ za pomocą modelu I i modelu II - rozwiązanie analityczne dla pojedynczego kanału okrągłego w obszarze nieskończonym, zastępując w modelu I warunki brzegowe (11) i (12) następującymi:

$$\vartheta(x,y,z,\tau) = 8^{o}C \quad \text{dla} \quad x = 0$$

$$\vartheta(x,y,z,\tau) = 8^{o}C \quad \text{dla} \quad y = y_p \; ; \; y = -y_p$$

Obliczenia przeprowadzono dla następujących warunków:

- grunt jednorodny $\lambda = 1,74\ W/m^2$, $a = 0,5 \cdot 10^{-6}\ m^2/s$,
- $w = 5\ m/s$,



Rys. 7. Przykładowa siatka dyskretyzacji dla modelu I
Skala 1:50

Fig. 7. Example of the discrete grid for the model I
Skale 1:50

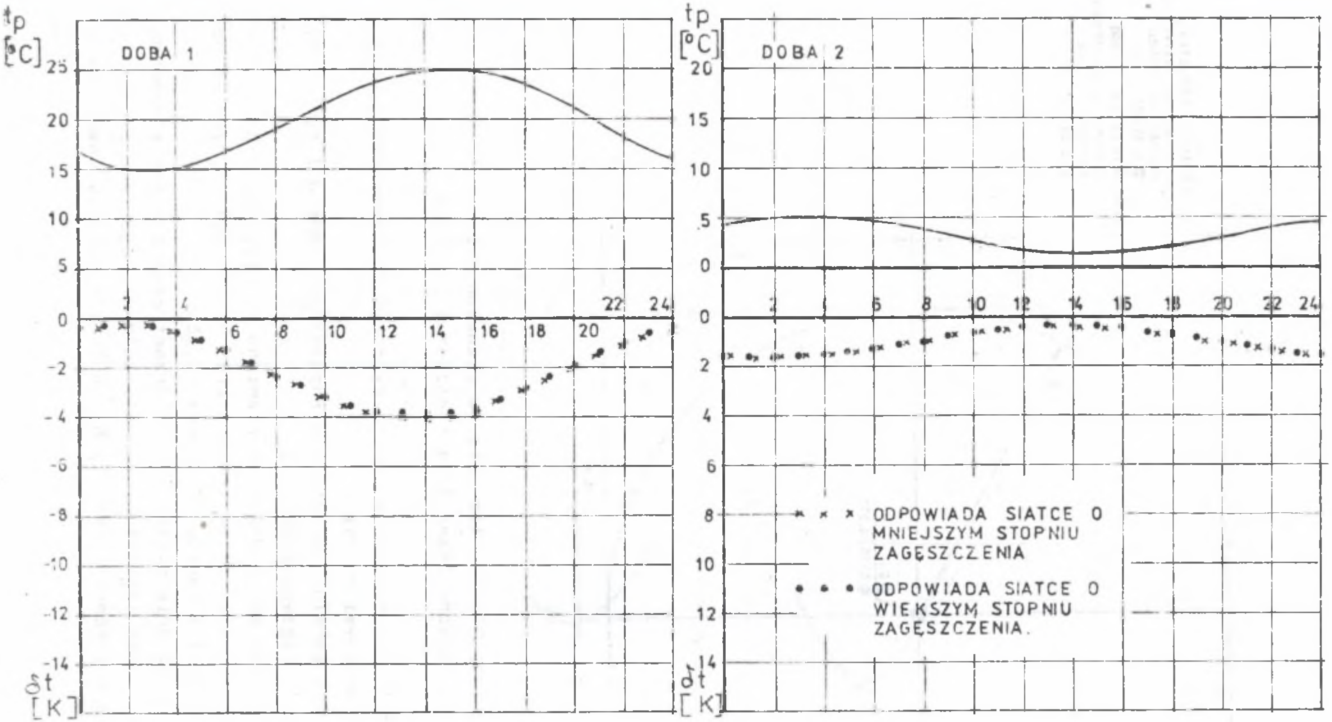
- l = 5 m,
- przebieg zmian temperatury powietrza napływającego do kanału tp(τ) zgodny z przyjętymi warunkami czasowymi.

W modelu I przyjęto:

⌸ = 0,710 x 0,710 m x m oraz obszar B zgodnie z rys. 9,

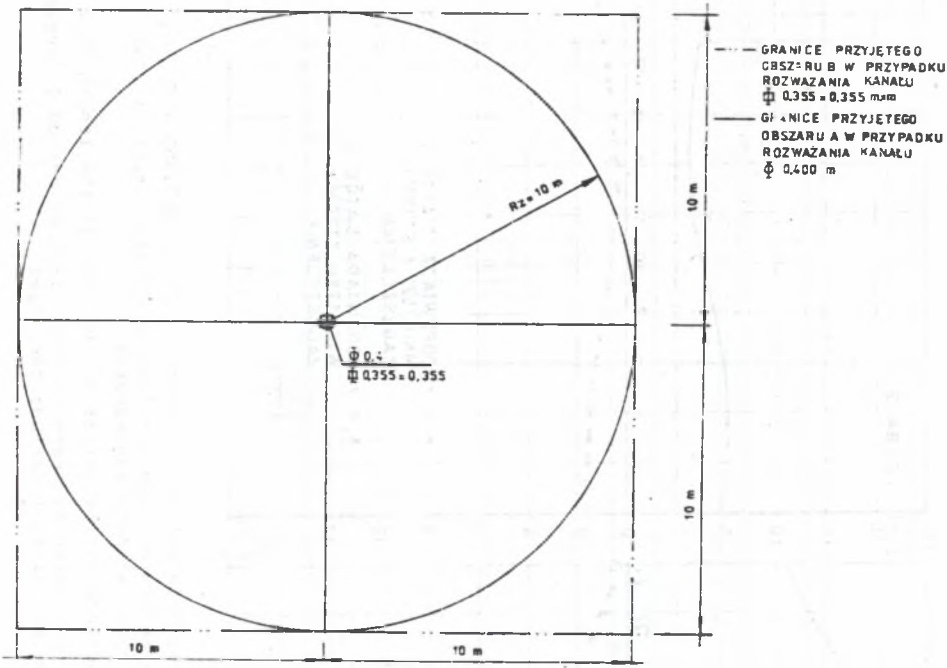
natomiast w modelu II:

r = RWA = 0,4 m ; RZ = 10 m - obszar A zgodnie z rys. 9.



Rys. 8. Przebiegi dobowe temperatury powietrza na wyjściu z kanału o długości 25 m, ◫0,355 x 0,355, λ_{gr} = 1,74 W/m^2 K, w = 5 m/s, obliczone za pomocą modelu cyfrowego I (obszar C) przy użyciu siatek o różnym stopniu zagęszczenia

Fig. 8. Twenty-four-hours air temperature distributions at the outlet of the duct of the length 25 m ◫0,355 x 0,355, λ_{gr} = 1,74 W/m^2 K, w = 5 m/s, calculated by means of the numerical method I (region C) with the use of grids of various densities



Rys. 9. Obszary przyjęte do rozważań w 6

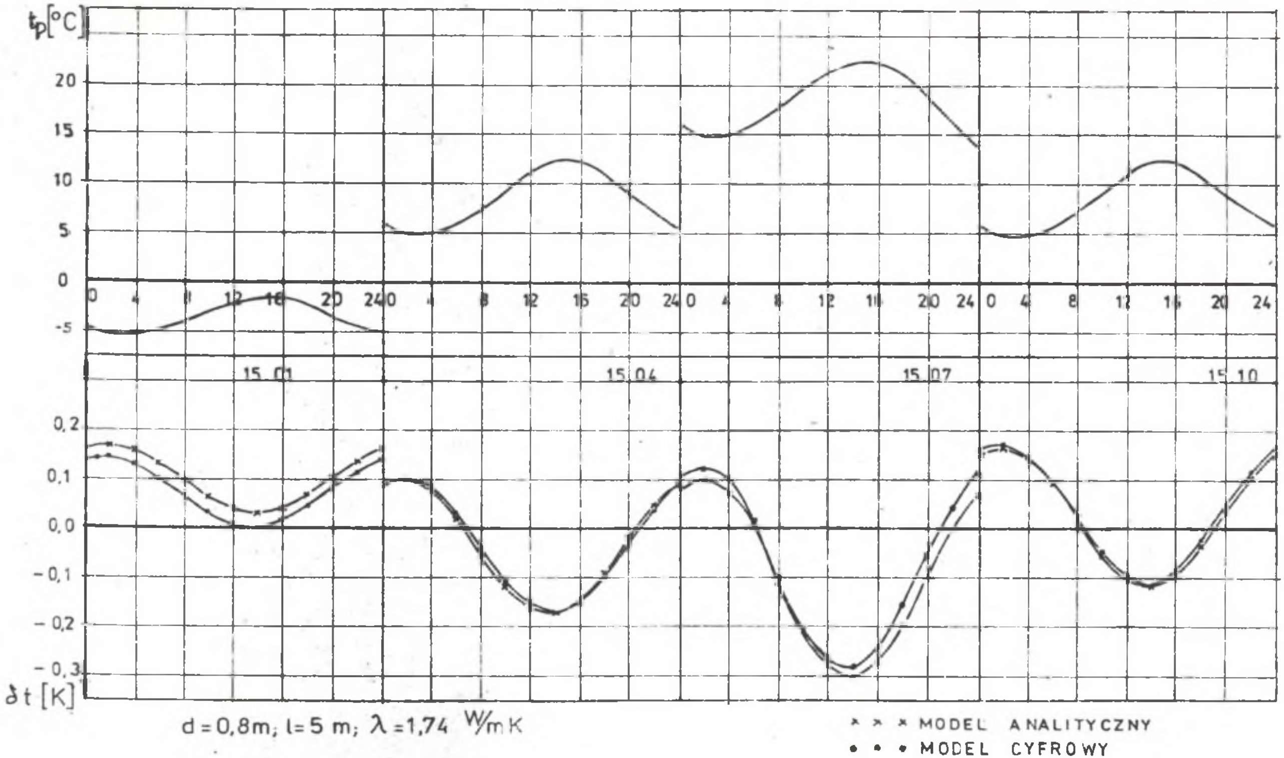
Fig. 9. Regions taken into consideration in 6

Siatkę dyskretyzacji przestrzeni w modelu cyfrowym I zbudowano zgodnie z zasadami przedstawionymi na rys. 7.

Promień hydrauliczny kanału kwadratowego rozważanego modelu I był równy promieniowi kanału okrągłego modelu II.

Wyniki obliczeń dla wybranych dni przedstawiono na rys. 10. Współczynnik korelacji liniowej wartości zmian temperatury $\Delta t_c(\tau)$ obliczonych za pomocą modelu cyfrowego I i modelu II wynosi 0,91.

Współczynnik ten uwzględnia dyskretyzację przestrzeni i czasu stosowaną w modelu cyfrowym I oraz zastąpienie kanału kwadratowego kanałem okrągłym w modelu II o średnicy równej średnicy hydraulicznej kanału kwadratowego.



Rys. 10. Przebiegi δt temperatury powietrza przepływającego z prędkością $w = 5$ m/s przez kanał o średnicy $d = 0,8$ m i długości $l = 5$ m zanurzony w obszarze jednorodnym nieskończonym, uzyskane podczas obliczeń za pomocą rozwiązania analitycznego i modelu cyfrowego I

Fig. 10. Plots of the temperature δt of the air flowing with the velocity $w = 5$ m/s through the duct of the diameter $d = 0,8$ m and the length $l = 5$ m placed in infinite uniform region obtained through the calculation carried out by means of analytical solution and the numerical model I

7. Wnioski

- Przedstawiony model cyfrowy stosunkowo dobrze odtwarza przebiegi zmian temperatury powietrza przepływającego kanałem usytuowanym w gruncie spoistym lub dowolnym z utwardzoną warstwą powierzchniową przy zagłębieniu kanału HKo > 1 m oraz w przypadku poziomu zwierciadła wody gruntowej spełniającego warunek Hwgr - HKo > 3-7 m.
- W nietypowych warunkach usytuowania kanałów wymiennika gruntowego (grunt piaszczysty, Hwgr - HKo < 3 m, HK < 1 m i warstwa powierzchniowa nieutwardzona) za pomocą przedstawionego modelu można określić przebiegi zmian temperatury δt stanowiące dolną granicę zmian odpowiadających przyjętym przebiegom porównawczym klimatu zewnętrznego.

W powyższych warunkach, wobec występowania zmiennego zawilgocenia gruntu, w celu wyznaczenia dokładnych wartości δt należy w modelu uwzględnić ruch wilgoci w gruncie.
W przypadku kanałów płytko zagłębionych w gruncie (HK < 1 m) należy uwzględnić również, w wymianie ciepła związanej z powierzchnią gruntu, promieniowanie długofalowe.

LITERATURA

[1] Wąsacz M.: Zagadnienie doboru wentylacji w domach towarowych. Praca doktorska, Gliwice 1980.

[2] Shinke H., Mostofizadeh Ch.: Messung von Erdreichtemperaturen bei direktem Warmeentzug durch den verdampfer einer Wärmepumpe. HLH nr 3, 1981.

[3] Bednarek R., Prusinkiewicz Z.: Geografia gleb PWN, Warszawa 1980.

[4] Kondracki J.: Geografia fizyczna Polski, PWN, Warszawa 1980.

[5] Foit H.: Wykorzystanie zdolności gruntu do akumulacji ciepła dla obróbki powietrza wentylacyjnego. Praca doktorska, Gliwice 1984.

[6] Recknagel, Sprenger: Ogrzewanie i klimatyzacja. Warszawa 1976.

[7] Szargut J.: Metody numeryczne w obliczeniach cieplnych pieców przemysłowych. Katowice 1977.

[8] Potler D.: Metody obliczeniowe fizyki. PWN, Warszawa 1977.

[9] Ralston A.: Wstęp do analizy numerycznej. PWN, Warszawa 1975.

[10] Wolska-Bochenek J. i inni: Zarys teorii równań całkowych i różniczkowych. PWN, Warszawa 1981.

ЦИФРОВАЯ МОДЕЛЬ ПРОТЕКАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВЕНТИЛЯЦИОННОГО ВОЗДУХА ПРОТЕКАЮЩЕГО ЧЕРЕЗ КАНАЛ ПОГРУЖЕННЫЙ В ГРУНТЕ

Р е з ю м е

Представлена цифровая модель протекания изменения температуры вентиляционного воздуха, перетекающего через канал погруженый в грунте. К решению системы разностьных уравнений использован метод Эксодус. Определена стоимость ошибки вытекающих из дискретизации пространства и времени вляющей на результаты вычисления при помощи представленной цифровой модели.

NUMERICAL MODEL OF TEMPERATURES CHANGES OF SUPPLIED VENTILATION AIR FLOWING THROUGH A SINGLE DUCT BURIED IN THE GROUND

S u m m a r y

A numerical model of temperature changes of ventilating air flowing in a single duct buried in the ground has been presented in the paper. In order to solve the differential equations system obtained from the thermal balance of elementary volumes the Exodus method has been employed. The value of the ervor resulting from assuming results obtained by means of the presented numerical model has been determined.