

Jan DRENDA, Krzysztof SŁOTA, Zbigniew SŁOTA
Politechnika Śląska, Gliwice

WYZNACZANIE ŚREDNIEJ TEMPERATURY PROMIENIOWANIA CIEPLNEGO OTOCZENIA Z WYKORZYSTANIEM TECHNIK KOMPUTEROWYCH

Streszczenie. Wyznaczanie średniej temperatury promieniowania ciepłego otoczenia (na przykład wyrobiska górniczego) polega na pomiarze średnich temperatur powierzchni otoczenia i obliczeniu współczynników kątowych (konfiguracji) tych powierzchni w stosunku do obserwatora. Tradycyjny sposób obliczeń jest bardzo pracochłonny, wymaga korzystania z tablic i wykresów, w związku z czym zaproponowano komputerową metodę (algorytm) obliczania średniej temperatury promieniowania. Korzystanie z nowoczesnych technik komputerowych, w tym z programów obliczeniowych, zapewnia poprawność uzyskiwanych wyników oraz możliwość ich szybkiej analizy i bezpieczeństwo przechowywania wszystkich danych.

MARKING OF AVERAGE RADIANT TEMPERATURE OF ENVIRONMENT WITH UTYLIZATION OF COMPUTER TECHNIQUES

Summary. Marking of average radiant temperature of environment (for example mining gallery) it depends on measurement of average temperatures of surfaces and calculation of angular coefficients (coefficient of configuration) of there surfaces in relation to observer. Traditional way of calculation is very labour-consuming, it demands using from tables and graphs, in relationship with what computer method (an algorithm) of calculation of average radiant temperature was proposed. Using from modern computer techniques, in this from computational programmes, safety of storage of all data assures correctness of got results as well as possibility of theirs fast analyses.

1. Promieniowanie ciepłe

Promieniowanie ciepłe zwane również promieniowaniem temperaturowym jest formą emisji energii przez powierzchnie ciał, których temperatury są wyższe od zera

bezwzględny. Posiada ono charakter fal elektromagnetycznych w zakresie długości od 0,1 μm do 1000 μm . W przedziale tym promieniowanie świetlne obejmuje bardzo wąską część, a mianowicie od 0,38 do 0,78 μm . Dla promieniowania cieplnego, podobnie jak dla każdego promieniowania elektromagnetycznego, posiadającego charakter falowy i korpuskularny, odnoszą się podstawowe prawa fizyki, takie jak: prawo Lamberta, Kirchhoffa, Wiena, Plancka, Stefana-Boltzmana [4, 5].

Przesyłana drogą promieniowania energia cieplna padając na powierzchnię, na przykład ciała stałego, ulega trzem reakcjom: przejmowaniu, odbiciu lub przepuszczaniu. Efekt ten zależy od rodzaju powierzchni oraz własności ciała opromienianego.

Sporządzając bilans rozdziału energii promienistej padającej na powierzchnię możemy napisać:

$$E = E_a + E_r + E_p, \quad (1)$$

gdzie:

E – całkowity strumień energii cieplnej padającej na powierzchnię,

E_a – strumień energii przejmowanej, czyli absorbowanej,

E_r – strumień energii podlegającej odbiciu, czyli refleksji,

E_d – strumień energii przepuszczanej, czyli transmitowanej.

Dzieląc równanie 1 przez E otrzymujemy:

$$\frac{E_a}{E} + \frac{E_r}{E} + \frac{E_d}{E} = 1, \quad (2)$$

$$A + R + D = 1, \quad (3)$$

gdzie:

A – absorpcyjność,

R – refleksyjność,

D – przepuszczalność.

Uwzględniając powyższe określenia ciała fizyczne dzieli się na:

- 1) doskonale czarne, dla których $A = 1$, $R = 0$ i $D = 0$,
- 2) doskonale białe, dla których $A = 0$, $R = 1$ i $D = 0$,
- 3) doskonale przezroczyste, dla których $A = 0$, $R = 0$ i $D = 1$.

W rzeczywistości w przyrodzie nie występują ciała doskonale czarne, doskonale białe czy doskonale przezroczyste. Występują natomiast ciała szare, dla których współczynniki A , R i D zawarte są w przedziale $(0 \div 1)$.

Oprócz pochłaniania, odbijania i przepuszczania ciała emitują energię promienistą. Stosunek strumienia energii cieplnej emitowanej przez powierzchnię ciała szarego do energii

cieplnej emitowanej przez tę samą powierzchnię ciała doskonale czarnego w tej samej temperaturze, nazywa się emisyjnością ε .

$$\varepsilon = \frac{E}{E_c} \quad (4)$$

Z prawa Kirchhoffa wynika, że emisyjność ciał równa się ich absorbcyjności, czyli:

$$\varepsilon = A \quad (5)$$

Ciało doskonale czarne posiada współczynnik emisyjności $\varepsilon = 1$, co oznacza, że posiada maksymalną zdolność emitowania i pochłaniania energii promieniowania. Współczynniki emisyjności powierzchni różnych ciał podane są w literaturze [5]. Dla ciała ludzkiego nie okrytego lub okrytego odzieżą współczynnik emisyjności promieniowania przyjęto równy $\varepsilon = 0.97$. Wartość ta świadczy o tym, że ciało ludzkie posiada dużą zdolność emisji promieniowania ciepłego do otoczenia oraz jego absorpcji z powierzchni otaczających.

Zgodnie z prawem Stefana-Boltzmana ilość ciepła emitowana przez ciało doskonale czarne wynosi:

$$E_c = \sigma \cdot A_p \cdot T^4, \quad (6)$$

gdzie:

σ – stała Stefana-Boltzmana,

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ [W/m}^2\text{K}^4\text{]},$$

A_p – pole powierzchni promieniującej [m^2],

T – temperatura powierzchni [K].

Dzieląc równanie (6) przez pole powierzchni A_p otrzymamy wzór na gęstość strumienia promieniowania ciepłego powierzchni:

$$e_c = \sigma \cdot T^4, \quad (7)$$

gdzie e_c – gęstość strumienia promieniowania ciepłego powierzchni [W/m^2].

Ze względu na dużą wartość T^4 wzór (7) można napisać w postaci:

$$e_c = C_c \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad (8)$$

gdzie $C_c = 5,67 \text{ [W/m}^2\text{K}^4\text{]}$ – techniczna stała promieniowania.

2. Człowiek w środowisku górniczym – średnia temperatura promieniowania cieplnego otoczenia

2.1. Wymiana ciepła pomiędzy człowiekiem a otoczeniem przez promieniowanie

Człowiek przebywający w dowolnym pomieszczeniu wymienia ciepło na drodze promieniowania z otaczającymi go powierzchniami ścian lub skał. W zależności od wartości temperatur pomiędzy powierzchnią ciała ludzkiego a powierzchniami zewnętrznymi różnica pomiędzy ciepłem emitowanym przez człowieka i przyjmowanym z otoczenia może być dodatnia lub ujemna, to znaczy człowiek może być ochładzany lub ogrzewany przez otoczenie.

Strumień ciepła promieniowania E_R pomiędzy powierzchnią ciała ludzkiego a otoczeniem określa równanie Stefana-Boltzmana:

$$E_R = \varepsilon_{cl} \cdot \sigma \cdot A_{ef} (T_{cl}^4 - T_{pr}^4), \quad (9)$$

gdzie:

ε_{cl} – emisyjność ciała ludzkiego,

A_{ef} – efektywne pole powierzchni człowieka wymieniające ciepło przez promieniowanie,

T_{cl} – średnia bezwzględna temperatura powierzchni ciała człowieka lub odzieży [K],

T_{pr} – średnia bezwzględna temperatura promieniowania otoczenia [K].

Współczynnik emisji ciała ludzkiego pokrytego lub nie pokrytego odzieżą należy przyjmować jako równy 0,97 [3]. Efektywne pole powierzchni człowieka A_{ef} równomiernie opromieniowywanego w środowisku o średniej temperaturze promieniowania t_{pr} Fanger proponuje obliczać ze wzoru:

$$A_{ef} = f_{ef} \cdot f_{cl} \cdot A_{Du} \quad , \quad (10)$$

gdzie:

f_{ef} – współczynnik efektywnego pola powierzchni promieniowania człowieka ubranego (przyjmuje się wartość $f_{ef} = 0,7$),

f_{cl} – stosunek pól powierzchni ciała pokrytego odzieżą do nie pokrytego, wyznaczony doświadczalnie (dla człowieka nieubranego $f_{cl} = 1$) [3],

A_{du} – pole powierzchni człowieka nagiego wg Dubois (dla dorosłego mężczyzny przyjmuje się $A_{Du} = 1,8 \text{ m}^2$).

2.2. Średnia temperatura promieniowania otoczenia

Średnia temperatura promieniowania T_{pr} oznacza temperaturę jednorodnego otoczenia (kula wokół człowieka) o doskonale czarnych powierzchniach, które powodowałyby straty ciepła przez promieniowanie równe stratom występującym w środowisku rzeczywistym.

Wyznaczenie T_{pr} wymaga znajomości geometrycznej konfiguracji otoczenia w celu znalezienia tak zwanych współczynników kierunkowych promieniowania φ_{pi} . Dla przestrzeni otaczającej zamkniętej suma współczynników kątowych $\Sigma\varphi_{pi} = 1$. Temperaturę T_{pr} można wyznaczać ze wzoru:

$$T_{pr}^4 = \sum_{i=1}^n \varphi_{pi} \cdot T_i^4, \quad (11)$$

gdzie:

T_i - temperatura i-tej powierzchni, [K],

φ_{pi} - współczynnik kierunkowy i-tej powierzchni, obliczony względem człowieka lub wyznaczony z tablic [3].

Jeśli obliczenia dotyczą przypadku, w którym między powierzchniami nie występują zbyt duże różnice temperatur ($\Delta T_i < 10K$), w celu szybkiego obliczenia temperatury można T_{pr} obliczać z liniowej średniej:

$$T_{pr} = \sum_{i=1}^n \varphi_{pi} \cdot T_i \quad (12)$$

Średnia temperatura promieniowania zależy od temperatur powierzchni pomieszczenia oraz od miejsca usytuowania człowieka w tym pomieszczeniu. Pewien wpływ na średnią temperaturę promieniowania ma również pozycja ciała ludzkiego (stojąca czy siedząca).

2.3. Współczynniki kątowe promieniowania

W literaturze podane są wzory i wykresy pozwalające wyznaczyć współczynniki kątowe promieniowania (współczynniki konfiguracji) dla człowieka w stosunku do ścian otoczenia. W celu wyznaczenia współczynników konfiguracji dla człowieka przebywającego w przodku w opracowaniu posłużono się nomogramami opracowanymi przez Fangera [3]. W celu uproszczenia obliczeń wybrano nomogramy odnoszące się do człowieka przebywającego w pomieszczeniu, w którym znane jest jego usytuowanie, ale nie jest znana orientacja. Przyjmuje się więc, że człowiek ten może obracać się dookoła własnej osi. Współczynniki

kątowe promieniowania dla takiego człowieka stanowią wartości średnie z różnych możliwych w pomieszczeniu.

Powierzchnie otoczenia, w stosunku do których wyznaczone są współczynniki kierunkowe promieniowania, są prostokątami o wymiarach $a \times b$ tak usytuowanymi, aby normalna w wierzchołku prostokąta przechodziła przez środek ciężkości człowieka. Dla człowieka siedzącego normalna ta powinna przebiegać 60 cm nad podłogą (spągami), dla człowieka stojącego 1 m nad podłogą. W przypadku założenia, że znana jest orientacja człowieka w pomieszczeniu, rozróżnia się dwa rodzaje powierzchni otoczenia, w stosunku do których można wyznaczyć współczynniki kątowe promieniowania. Są to powierzchnie pionowe (ściany boczne) oraz poziome (podłoga, sufit lub spąg, strop).

Na rysunkach 1- 4 przedstawione są szkice usytuowania człowieka w stosunku do wymienionych powierzchni oraz nomogramy pozwalające wyznaczyć współczynniki kątowe promieniowania ciała ludzkiego w stosunku do danej powierzchni prostokątnej. Aby skorzystać z nomogramów należy obliczyć stosunki wymiarów powierzchni a i b do odległości c , stanowiącej najbliższą odległość tej powierzchni od przyjętego środka ciężkości człowieka.

Ścianę rozpatrywano jako model pomieszczenia w kształcie tunelu o przekroju prostokątnym. Długość ściany oznaczono jako „ a ”, natomiast szerokość dla płaszczyzn poziomych lub wysokość dla płaszczyzn pionowych jako „ b ”. Wielkość „ c ” stanowiła odległość człowieka od poszczególnych płaszczyzn otoczenia [1].

3. Komputerowe wspomaganie obliczania średniej temperatury promieniowania cieplnego otoczenia oraz współczynników kątowych promieniowania

Przedstawiony wyżej sposób obliczania i wyznaczania średniej temperatury promieniowania cieplnego otoczenia wraz ze współczynnikami kątowymi promieniowania ma swoje wady i zalety, lecz jest to sposób bardzo pracochłonny i wymaga wiele czasu.

Autorom artykułu nie były znane do tej pory żadne proste i ogólnodostępne programy, wspomagające obliczenia tego typu. Dotychczasowe opracowania tego tematu mają postać tylko i wyłącznie nomogramów oraz tablic [3], które nie pozwalają jednak obliczyć bezpośrednio potrzebnych wartości. W związku z tym opracowano algorytm komputerowy, umożliwiający w znacznym stopniu uproszczenie powyższych obliczeń. Na podstawie

algorytmu powstał program Z.K.S. MOSTO 2000¹, którego autorami są Zbigniew i Krzysztof Słota. Oparty został on na przedstawionych nomogramach i omówionych wcześniej wzorach. Obsługa programu jest intuicyjna, a z doświadczenia autorów artykułu wynika, że student uczelni technicznej potrzebuje zaledwie kilku minut na naukę obsługi programu.

Program został stworzony dla celów naukowo-badawczych, a wykorzystywany jest głównie do obliczania średniej temperatury promieniowania cieplnego otoczenia przy wykonywaniu pomiarów klimatu oraz badań eksperymentalnych, na przykład w komorach klimatycznych, w wyrobiskach i komorach kopalń węgla i rudy miedzi. Za pomocą programu mogą być wykonywane obliczenia prognostyczne przy projektowaniu zasłon chłodzących w wyrobiskach kopalń [1, 2].

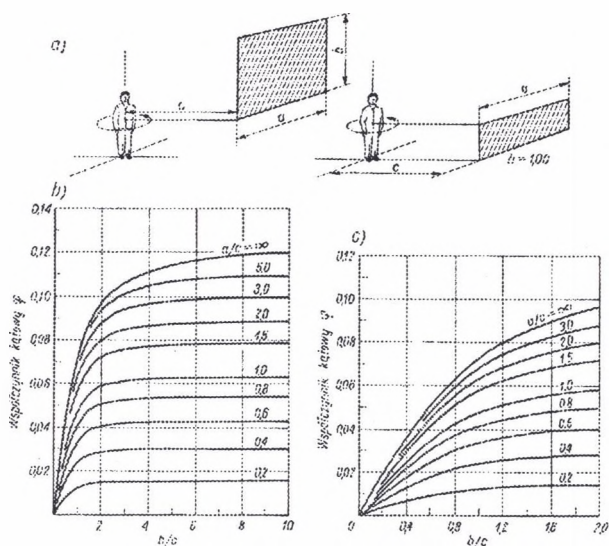
Obsługa programu

Program Z.K.S. MOSTO 2000 działa na każdym komputerze wyposażonym w system operacyjny Windows 95/98/NT/ME/2000 lub XP. Po uruchomieniu programu na ekranie widoczne jest „okno główne programu” (rys. 5).

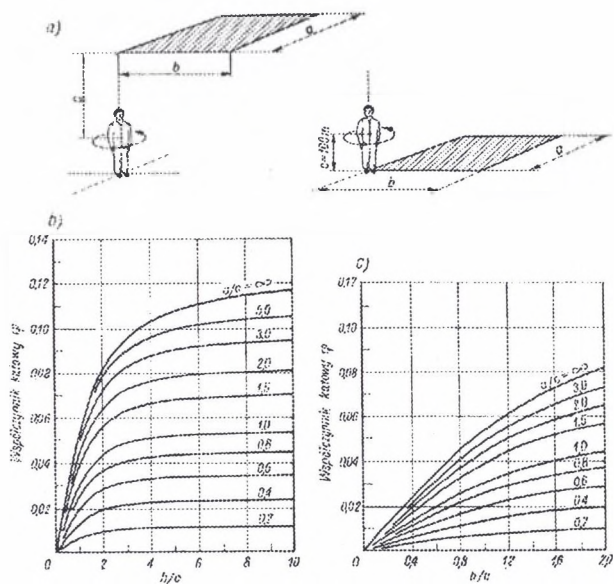
Poszczególne oznaczenia, ich jednostki i zakresy, które zostały użyte w programie:

- a) wymiary pomieszczenia: szerokość – „x”, długość – „y” oraz wysokość – „z” – podawane w m, powyżej 1m,
- b) miejsce położenia człowieka – „xc” i „yc” – podawane w m oraz pozycja (stojąca lub siedząca), w której znajduje się człowiek,
- c) średnie temperatury powierzchni ścian: północnej – „tN”, południowej – „tS”, wschodniej – „tE”, zachodniej – „tW” oraz sufitu – „tU” i podłogi – „tD” – podawane w °C, w zakresie od -273 °C,
- d) średnia temperatura promieniowania cieplnego otoczenia – „t_{prsr}” – podawana w °C.

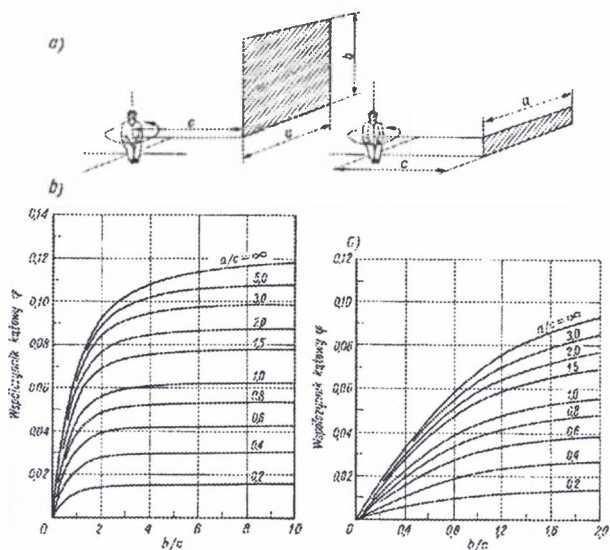
¹ Program Z.K.S. MOSTO jest częścią pakietu Z.K.S. Multiklimat 2000 służącego do wspomaganie złożonych obliczeń z zakresu wentylacji i klimatyzacji. Pakiet ten zawiera następujące programy: Z.K.S. Mollier 2000, Z.K.S. MOC 2000 oraz Z.K.S. Miiks 2000. Wersje shareware wszystkich programów oraz całego pakietu dostępne są na stronie internetowej: www.multiklimat2000.prv.pl



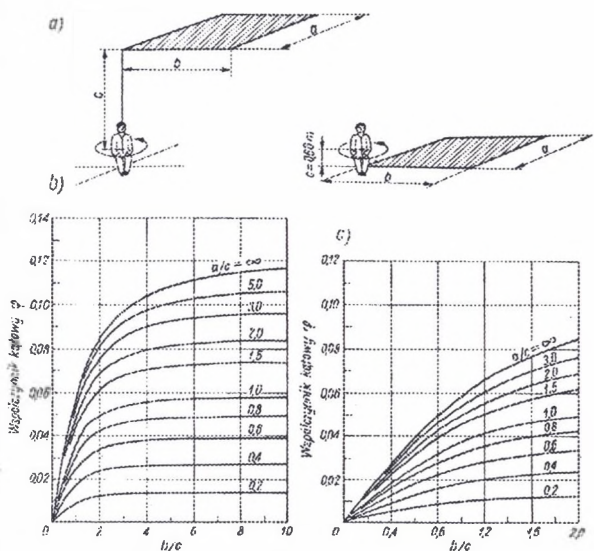
Rys. 1. Średnie wartości współczynnika kąowego promieniowania pomiędzy człowiekiem w pozycji stojącej a prostokątem leżącym na pionowej płaszczyźnie ponad lub pod środkiem ciała (nieznana jest orientacja człowieka w pomieszczeniu)
 Fig. 1. Average angular coefficients of radiation for man and vertical surfaces



Rys. 2. Średnie wartości współczynnika kąowego promieniowania pomiędzy człowiekiem w pozycji stojącej a prostokątem leżącym na suficie lub podłodze (stropie lub spągu), (nieznana jest orientacja człowieka w pomieszczeniu)
 Fig. 2. Average angular coefficients of radiation for man and horizontal surfaces



Rys. 3. Średnie wartości współczynnika kątego promieniowania pomiędzy człowiekiem w pozycji siedzącej a prostokątem leżącym na pionowej płaszczyźnie ponad lub pod środkiem ciała (nieznana jest orientacja człowieka w pomieszczeniu)
 Fig. 3. Average angular coefficients of radiation for man and vertical surfaces



Rys. 4. Średnie wartości współczynnika kątego promieniowania pomiędzy człowiekiem w pozycji siedzącej a prostokątem leżącym na suficie lub podłodze (stropie lub spągu), (nieznana jest orientacja człowieka w pomieszczeniu)
 Fig. 4. Average angular coefficients of radiation for man and horizontal surfaces

pasek ikon (od lewej: kalkulator, zarządzanie plikami, wydruk, pomoc)

pole wprowadzania danych

rysunek poglądowy (z zaznaczoną wprowadzaną aktualnie wartością)

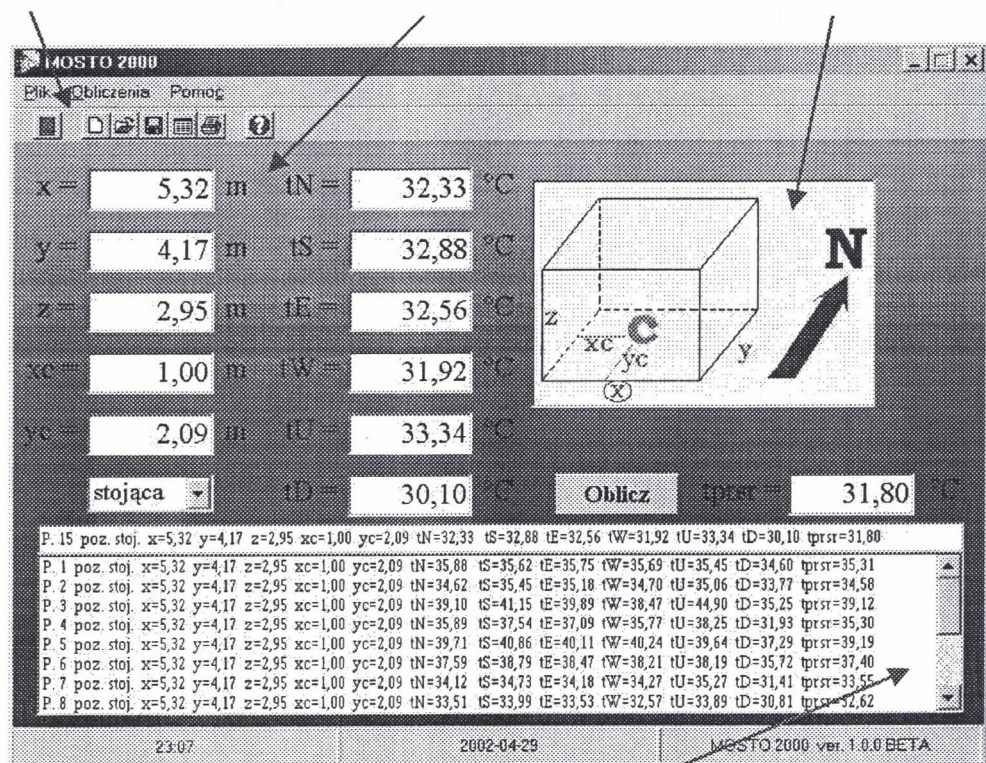


tabela zbiorcza wyników obliczeń

Rys. 5. Okno główne programu

Fig. 5. The main interface

4. Podsumowanie

Celem autorów artykułu było przedstawienie obecnego sposobu obliczania średniej temperatury promieniowania cieplnego otoczenia, ze szczególnym zwróceniem uwagi na wspomaganie obliczeń technikami komputerowymi. Program komputerowy jest dobrym narzędziem do skrócenia czasu potrzebnego na obliczenia wentylacyjne i klimatyczne, podwyższa ich dokładność (zwłaszcza, gdy musimy odczytywać dane z mało dokładnych wykresów) oraz pozwala zachować na nośniku elektronicznym wszystkie obliczenia, z których w łatwy sposób można skorzystać w przyszłości.

Program Z.K.S. MOSTO 2000, który został zaprezentowany w niniejszym artykule, działa samodzielnie, lecz w połączeniu z pozostałymi programami, wchodzącymi w skład pakietu Z.K.S. Multiklimat 2000, pozwala na rozwiązywanie bardziej skomplikowanych zagadnień z zakresu klimatyzacji i wentylacji.

LITERATURA

1. Drenda J.: Dyskomfort cieplny w środowiskach kopalń głębokich. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Górnictwo, z. 213, Gliwice 1993.
2. Drenda J.: Określenie i pomiar średniej temperatury promieniowania w wyrobisku górniczym. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Górnictwo, z. 99, Gliwice 1979.
3. Fanger P.O.: Komfort cieplny. „Arkady”, Warszawa 1974.
4. Kostowski E.: Promieniowanie cieplne. PWN, Warszawa 1983, s. 131-175.
5. Sala A.: Radiacyjna wymiana ciepła. PWN, Warszawa 1982, s. 170-220.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Bernard Nowak

Abstract

Performance of present way of calculation of average radiant temperature of environment was aim of authors of article, with special return of attention onto aid of calculation computer technicians. Computer programme is best tool to shortening of necessary time onto ventilate calculations and climatical, them exactitude raises (especially, when we have to read data from little keep on electronic carrier of all calculation, from of which into easy way it was been possible to use in future.

Programme Z.K.S. MOSTO 2000 which became presented in this article, it happened separately, but in connection with remaining programmes, enterings into warehouse of package Z.K.S. Multiklimat 2000, it permits compiled questions in the way of air-conditioning and ventilation onto dissolving more.