

Krystyna TURKIEWICZ

OCENA WARUNKÓW CIEPLNYCH HALI PRZEMYSŁOWEJ
PRZY OGRZEWANIU POWIETRZNYM

Streszczenie. W ramach prac przygotowawczych do serii badań modelowych nad podniesieniem efektywności ogrzewania powietrznego dużych pomieszczeń przeprowadzono badania warunków cieplnych w hali przemysłowej. Przedstawiono wykresy pól temperatur i prędkości powietrza oraz temperatur promieniowania w hali, a dalej zaproponowano kryteria oceny warunków cieplnych strefy pracy w oparciu o statystykę matematyczną.

1. Wprowadzenie

W nowo wybudowanych w Polsce zakładach przemysłowych wyłoniła się potrzeba poprawy rozwiązań ogrzewania powietrznego dużych hal.

Typowe urządzenia ogrzewczo-wentylacyjne w większości przypadków charakteryzują się tym, że doprowadzają do pomieszczenia duże ilości ciepła za pomocą małej ilości powietrza (Svenska F - ATDA, Rada; Wanson - DLC, Thermobloc MTP; Termowent - AOWW, AOWP). Przy recyrkulacji ilość ciepła dostarczana w jednym m³ powietrza wynosi 29,0 ÷ 67,0 kJ. Biorąc pod uwagę, że straty ciepła dużych hal przemysłowych wynoszą 11,0 ÷ 23,0 W/m³ [1], [2], dla ich pokrycia wystarcza wydatek powietrzny aparatów, odpowiadający 1 ÷ 2-krotnej wymianie powietrza. Taka częstotliwość wymiany jest za mała dla zorganizowania ruchu powietrza w hali i dla wyrównania rozkładu jego temperatury. Równocześnie stosowane prędkości wylotowe powietrza nawiewanego nie są zbyt wysokie; mieszczą się w granicach 2 do 6 m/s.

Obie te wielkości: wydatek i prędkość wylotową powietrza można scharakteryzować jednostkową kinetyczną energią nawiewu:

$$\dot{E}_N = \frac{\dot{m}_N w_N^2}{2} \quad (1)$$

Jednostkową energię strumieni nawiewanych, odniesioną do 1 m³ pomieszczenia, określa wzór:

$$\dot{e}_N = \frac{\dot{m}_N w_N^2}{2V} \quad (2)$$

Biorąc pod uwagę, że:

$$\dot{m}_N = \dot{V} \rho$$

$$Z = \frac{\dot{V}}{V}$$

otrzymamy:

$$\dot{e}_N = \frac{\rho Z w_N^2}{2} \quad (3)$$

Jednostkowa kinetyczna energia strumieni nawiewanych przez produkowane obecnie urządzenia ogrzewczo-wentylacyjne wynosi 0,001 W/m³ do 0,03 W/m³. Nawiewanie dużej ilości ciepła za pomocą małej ilości powietrza wymaga wysokiej temperatury powietrza nawiewanego. Wynosi ona w omawianych rozwiązaniach od 60°C do 35°C.

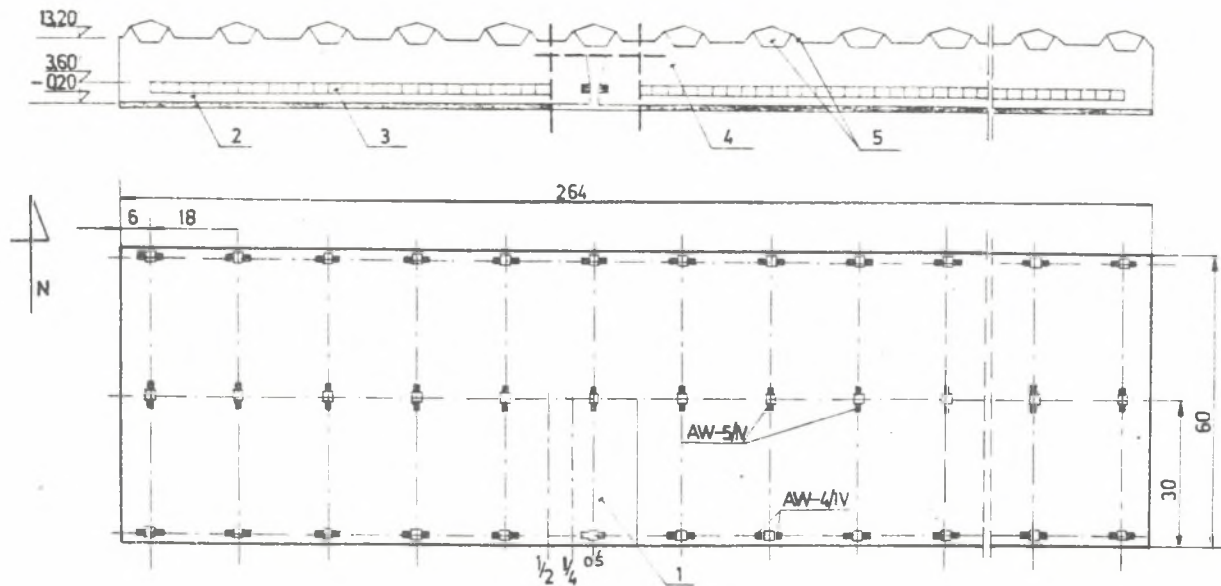
Niewielka jednostkowa energia kinetyczna strumieni nawiewanych sprzyja zatem powstawaniu w hali sił wyporu, związanych z dużą różnicą temperatur powietrza nawiewanego i otaczającego. Wynika stąd znaczne zróżnicowanie temperatury powietrza w strefie pracy i na wysokości obiektu.

Jednym ze stosowanych sposobów eliminowania "ucieczki" strumienia powietrza ogrzewającego pod strop pomieszczenia jest kierowanie go do strefy pracy.

Nie jest to jednak rozwiązanie korzystne z punktu widzenia warunków cieplnych, wytwarzanych przez ten strumień w strefie pracy. Według [3] temperatura początkowa strumienia powietrza kierowanego do miejsc przebywania ludzi nie powinna być niższa od 35°C. Takie temperatury nawiewu występują jednak tylko w pewnych okresach sezonu ogrzewniczego. Przy stałym wydatku powietrza z aparatu temperatura wylotowa powietrza nawiewanego musi bowiem zmieniać się odpowiednio do warunków zewnętrznych. Prędkość wylotowa powietrza pozostaje stała, a stąd niższe od 35°C temperatury powietrza w zasięgu strumienia nawiewanego wywołują u ludzi wyraźne odczucie chłodu [4].

Powszechnie obserwowane niedomagania ogrzewań powietrznych, objawiające się niewłaściwym rozkładem temperatury powietrza w pomieszczeniu, są motorem nowych tendencji w tej dziedzinie. Nowe rozwiązania takich ogrzewań coraz częściej pozwalają operować strumieniami powietrza o dużo większej energii nawiewu i coraz bardziej w swej technicznej postaci zbliżają się do rozwiązań mechanicznej wentylacji.

W ramach prac przygotowawczych do serii badań modelowych nad podniesieniem efektywności ogrzewania powietrznego hal przemysłowych (omówionych w [5], [6]) przeprowadzono badania warunków cieplnych w hali ogrzewanej typowymi aparatami ogrzewczo-wentylacyjnymi.



Rys. 1. Dane charakterystyczne obiektu, w którym przeprowadzono pomiary

1 - segment, w którym przeprowadzono pomiary; 1/2, 1/4, oś - przekroje pomiarowe (do rys. 2 i 3), 2 - cegła ceramiczna pełna spoinowa, grubość 0,25 m, $K = 1,92 \text{ W/m}^2\text{deg}$, 3 - okna stalowe pojedynczo szkolne, grubość szyb 0,006 m, $K = 5,93 \text{ W/m}^2\text{deg}$, 4 - blacha falista ocynkowana ocieplana wełną żuźlową, od wewnątrz tynk wapienny $K = 1,34 \text{ W/m}^2\text{deg}$, 5 - świetliki

Badania te pozwoliły na rozpoznanie zjawisk występujących w obiekcie ogrzewanym powietrzem, które należało zamodelować oraz były podstawą przyjęcia kryteriów oceny warunków cieplnych w strefie pracy.

2. Warunki cieplne w hali

Badania poligonowe warunków cieplnych zostały przeprowadzone w hali przemysłowej o objętości $209\ 000\ \text{m}^3$. Dane charakterystyczne obiektu przedstawiono na rys. 1. W hali tej brak źródeł ciepła i wilgoci, praca prowadzona jest na trzy zmiany.

Badania ruchu powietrza przeprowadzono w całej hali, natomiast dla szczegółowych pomiarów cieplnych wybrany został jeden z powtarzających się w hali segmentów (rys. 1).

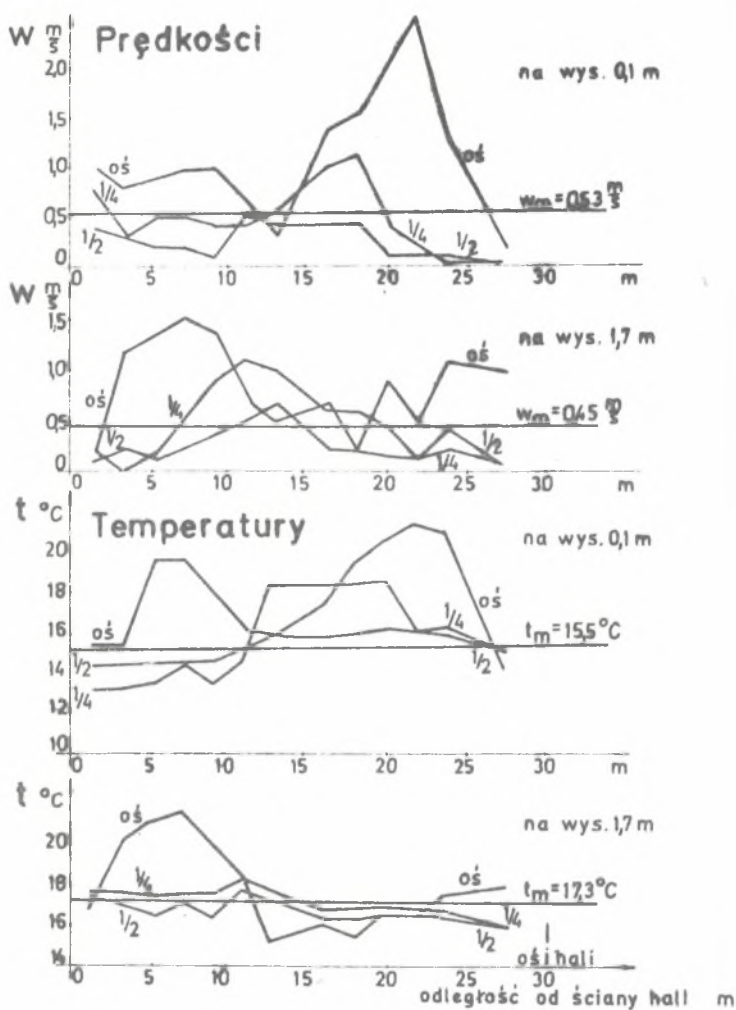
Tabela 1

Zewnętrzne warunki klimatyczne i charakterystyczne parametry pracy instalacji ogrzewania powietrznego w trakcie badań

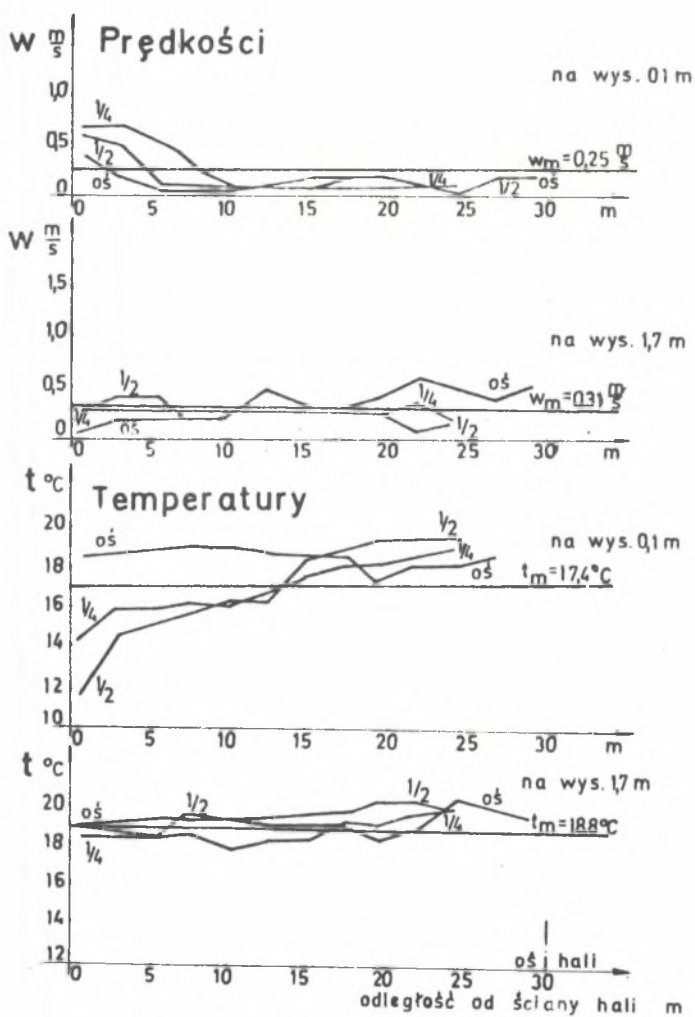
Pozycja	Wyszczególnienie	Oznaczenie	Wymiar	Seria		
				I	II	III
1	2	3	4	5	6	7
1	Kąt otwarcia żaluzji	α_z	$^\circ$	$90^{xx)}$	60	60
2	Temperatura powietrza zewnętrznego	t_z	$^\circ\text{C}$	+2,9	+3,9	-4,7
3	Prędkość wiatru	w_z	m/s	$2,5 \div 4$	$1 \div 6$	0
4	Stopień zachmurzenia	B	%	100	100	0
5	Strumień powietrza nawiewanego przez aparat AW5	\dot{V}_{N-AW5}	$\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ $\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$	2,03 7300	2,08 7500	2,08 7500
6	Strumień powietrza nawiewanego przez dwa aparaty AW4	$2\dot{V}_{N-AW4}$	$\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ $\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$	2,11 7600	2,08 7500	2,08 7500
7	Częstotliwość wymiany powietrza w badanych segmentach	Z	1/h 1/s	$2,1^{xx)}$ $5,8 \cdot 10^{-4}$	2,1 $5,8 \cdot 10^{-4}$	2,1 $5,8 \cdot 10^{-4}$
8	Strumień ciepła nawiewanego do jednego segmentu	\dot{Q}_N	W	$9,3 \cdot 10^4$	$9,3 \cdot 10^4$	$10,5 \cdot 10^4$
9	Strumień ciepła odniesiony do pojemności hali	q_N	W/m^3	13,1	13,1	14,8
10	Temperatura wywiewu	t_u	$^\circ\text{C}$	19,2	21,2	16,2
11	Temperatura nawiewu	t_N	$^\circ\text{C}$	39,3	41,6	38,8

x) otwarcie żaluzji 90° uzyskano usztywniając je dodatkowo.

xx) Pojemność jednego segmentu powtarzalnego hali $V = 7100\ \text{m}^3$.



Rys. 2. Profile prędkości i temperatury powietrza w wybranych przekrojach w strefie pracy, seria III



Rys. 3. Profile prędkości i temperatury powietrza w wybranych przekrojach w strefie pracy, seria I

Temperatura wody zasilającej aparaty odbiegała w czasie pomiarów od wartości przewidzianych programem ogrzewania. Rozbieżności temperatur w tym zakresie wynosiły:

w serii I $+20 \div +30$ deg

w serii II $+20$ deg

w serii III $-5 \div -10$ deg.

W tabeli 1 scharakteryzowano zewnętrzne warunki klimatyczne i parametry pracy instalacji ogrzewczej dla poszczególnych serii pomiarowych.

Badania miały na celu określenie warunków cieplnych poprzez pomiary rozkładu temperatury i prędkości powietrza oraz temperatury powierzchni przegród. Wyrywkowo mierzono również wilgotność powietrza w hali. Pomiary przeprowadzono w oparciu o siatkę pomiarową o boku 0,3 m. Zebrany materiał pomiarowy jest obszerny. Uwidocznia on charakterystyczne właściwości rozkładu prędkości i temperatury powietrza.

Przy nawiewaniu ogrzewającego powietrza bezpośrednio do strefy pracy (seria II i III) w strefie tej występowało znaczne zróżnicowanie wartości parametrów cieplnych. Ilustruje to rysunek 2, na którym podano wyniki pomiarów w płaszczyźnie przekroju biegnącego pionowo wzdłuż osi strumienia nawiewanego oraz w przekrojach położonych w połowie i jednej czwartej odległości między sąsiednimi aparatami ogrzewczymi. Położenie przekrojów pomiarowych zaznaczono na rys. 1.

Przy nawiewaniu powietrza ogrzewającego równoległe do podłogi (seria I) zróżnicowanie temperatury i prędkości powietrza w strefie pracy było dużo mniejsze (rys. 3). W strefie tej występowały bowiem przede wszystkim wtórne cyrkulacyjne ruchy powietrza.

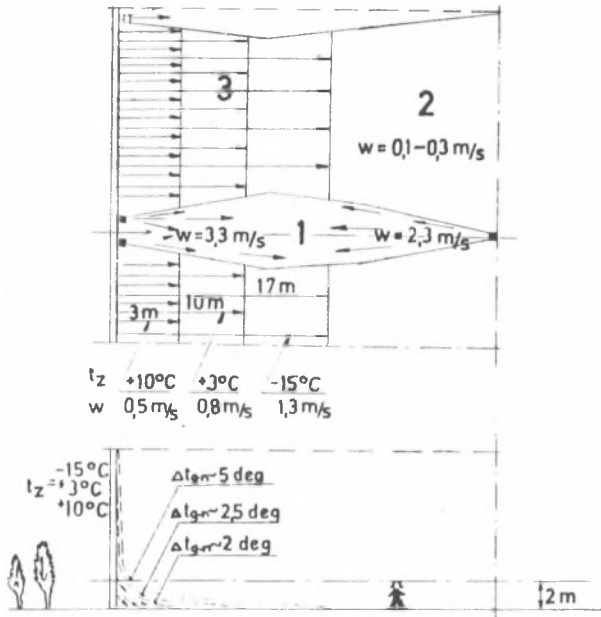
We wszystkich trzech seriach pomiarowych, a więc prawie niezależnie od kierunku nawiewania powietrza ogrzewającego, występowała wzdłuż ściany zewnętrznej strefa znacznego ochłodzenia powietrza.

Rozkład temperatury w przestrzeni ponad aparatami ogrzewczo-wentylacyjnymi nie miał większego znaczenia dla warunków cieplnych w strefie pracy, natomiast wpływał w istotny sposób na straty ciepła obiektu. W badanej hali zmierzono wyraźny wzrost temperatury w warstwie powietrza grubości $3\div 5$ m pod dachem. Wzrost ten wynosił $3\div 5$ deg. Natomiast poniżej tej cieplej warstwy, w warstwie pośredniej o grubości $4\div 6$ m, występował względny bezruch powietrza, charakteryzujący się prędkościami rzędu 0,1 m/s i małym zróżnicowaniem temperatury.

Przyczyną pojawienia się przegrzanej warstwy pod dachem był stały ruch mas powietrza w hali, mało zależny od pracy aparatów ogrzewczo-wentylacyjnych i ich umieszczenia względem siebie.

Ruch mas powietrza powodowały takie czynniki, jak:

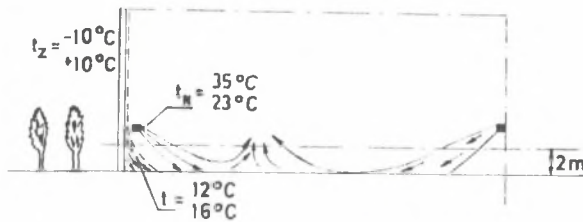
- oddziaływanie południowo-wschodnich wiatrów na budynek,
- przegrzanie południowej części hali, wynikające z nasłonecznienia ścian oraz niewyregulowania wewnętrznej sieci cieplnej, zasilającej aparaty ogrzewcze.



Przekrój hali poza zasięgiem strumienia

Rys. 4. Obszary różnych warunków cieplnych w strefie pracy

1 - obszar oddziaływania strumieni nawiewnych, 2 - obszar poza zasięgiem strumieni, 3 - obszar wpływu ścian zewnętrznych



Przekrój hali w osi strumieni nawiewnych

Rys. 5. Rozprzestrzenianie się strumieni nawiewnych w badanych hali

W dalszych rozważaniach zajęto się przede wszystkim warunkami cieplnymi strefy pracy. W strefie tej można było wyraźnie wyodrębnić następujące obszary (rys. 4) o różnych warunkach cieplnych:

- obszar bezpośredniego oddziaływania nawiewanych strumieni,
- obszar poza zasięgiem tych strumieni,
- obszar wpływ ścian zewnętrznych.

Obszar oddziaływania strumieni nawiewanych (rys. 5) zajmuje 20÷30% obszaru strefy pracy. Charakteryzuje się dużą prędkością i temperaturą powietrza oraz dużym przestrzennym zróżnicowaniem wartości tych parametrów.

- W badanym obiekcie kształtowały się one w omawianym obszarze następująco:
- prędkość powietrza w osi aparatu AW-4 w odległości 3,5 m od płaszczyzny wylotu wynosiła na poziomie głowy 3,3 m/s, na poziomie nóg 0,3 m/s,
 - prędkość powietrza w osi aparatu AW-5 w odległości 6 m od płaszczyzny wylotu wynosiła na poziomie głowy 0,8 m/s, na poziomie nóg 2,3 m/s.

Wyniki pomiarów temperatury powietrza podają tabele 2 i 3.

Tabela 2

Temperatura powietrza w obszarze strumienia nawiewanego

Seria pomiarowa	Pomiar w osi aparatu	Odległość od płaszczyzny wylotu	t_g °C temperatura powietrza na poziomie głowy (1,7 m)	t_n °C temperatura powietrza na poziomie nóg (0,1 m)	Δt_{g-n} deg różnica temperatur na wysokości człowieka	Uwagi
II $t_z = +3,9^\circ\text{C}$	AW-4/IV	3,6	32,5	21,3	11,2	$\alpha_z = 60^\circ$
		5,4	27,0	23,7	3,3	
	AW-5/IV	6,0	19,3	22,2	2,9	
III $t_z = -4,70^\circ\text{C}$	AW-4/IV	3,6	27,4	13,8	13,9	$\alpha_z = 60^\circ$
		5,4	23,0	15,7	7,3	
	AW-5/IV	6,0	18,0	21,3	3,3	

Należy zwrócić uwagę, że różnice temperatur na poziomie głowy i nóg (tab. 2) przekraczały wartość 2 deg, jaka przyjmowana jest za graniczną z uwagi na możliwości termoregulacyjne organizmu człowieka.

Znaczna prędkość strumienia powietrza, przekraczająca 1 m/s, była również nadmierna i niekorzystna dla człowieka, a ponadto powodowała wtórne zapylenie w hali.

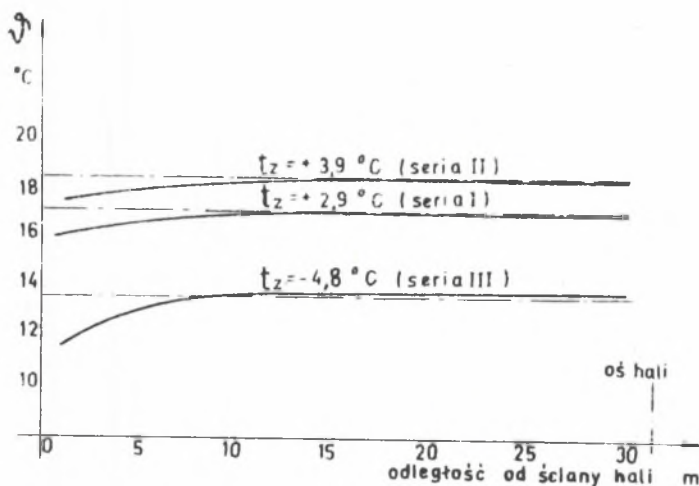
Ochłodzenie powietrza w sąsiedztwie ścian zewnętrznych powodowało powstawanie chłodnych strumieni konwekcyjnych. Zasięg i sposób rozprzestrzeniania się tych strumieni, przedstawione na rys. 4, były zależne od zewnętrznych warunków klimatycznych i wykazywały zmiany zarówno w ciągu doby, jak i sezonu ogrzewniczego.

W strefie zasięgu tych strumieni różnica temperatur powietrza na poziomie głowy (1,7 m) i nóg (0,1 m) wynosiła przeciętnie od 2,5 deg do 3,2 deg.

Średnie prędkości powietrza na poziomie głowy były niewielkie i wynosiły do 0,3 m/s. Natomiast na poziomie nóg były one zróżnicowane i wynosiły od 0,7 m/s do 1 m/s.

Powyższe dane wykazują, że obszar hali w pobliżu ścian zewnętrznych był znacznie wychłodzony, a ponadto prędkość powietrza osiągała w nim niekorzystnie duże wartości na poziomie nóg. Jednocześnie w obszarze tym ob-

niżona była średnia temperatura promieniowania, co ilustruje rys. 6. Wszystkie te czynniki składały się na wyraźne pogorszenie warunków cieplnych tego obszaru w stosunku do innych części hali. Obserwowane strumienie konwekcyjne opadające wzdłuż okien i ścian zewnętrznych były przy tym na tyle intensywne, że przeciwdziałanie im za pomocą nawiewu z aparatów ogrzewczo-wentylacyjnych, umieszczonych tradycyjnie na słupach, było nieskuteczne.



Rys. 6. Temperatury promieniowania przegród w hali obliczone dla poziomu 1,2 m od podłogi

— — — — — średnia temperatura promieniowania, — — — — — średnia temperatura powierzchni

Obszar hali poza bezpośrednim zasięgiem strumieni nawiewanych i chłodnych strumieni konwekcyjnych posiadał najdogodniejsze warunki cieplne. W obszarze tym nie obserwowano znacznego zróżnicowania temperatur i prędkości powietrza. Pionowe i poziome zróżnicowanie temperatury nie przekraczało 1 deg., a wahania prędkości mieściły się w granicach 0,1÷0,3 m/s. Ponadto w obszarze tym średnie temperatury promieniowania były praktycznie stałe (rys. 6). Wobec małego zróżnicowania przestrzennego parametrów cieplnych, o tym, jak dalece warunki w tym obszarze zbliżone są do komfortu cieplnego, decydowała zatem temperatura powietrza.

3. Kryteria oceny warunków cieplnych

Dla umożliwienia interpretacji wyników badań, a w dalszych pracach wyboru właściwych rozwiązań ogrzewania powietrznego, należało przyjąć kryteria oceny warunków cieplnych w strefie pracy.

Istniejące metody w tym zakresie biorą pod uwagę jako czynniki charakteryzujące warunki ciepłe: prędkość, temperaturę i wilgotność powietrza, temperaturę otaczających przegród oraz rodzaj pracy i izolacyjność odzieży ludzi. Stosowane [1, 7, 8, 9] pojęcia temperatury odczuwalnej, wynikowej i efektywnej oraz wskaźników mikroklimatu wyprowadzone zostały dla pomieszczeń o wyrównanej temperaturze i prędkości powietrza. Natomiast wyniki pomiarów temperatury i prędkości powietrza w istniejącej hali ogrzewanej powietrzem wskazywały na bardzo zróżnicowany rozkład tych parametrów zarówno w pionie, jak i w poziomie.

W metodzie Fangera [10] niejednorodność cieplna pomieszczenia została uwzględniona w formie wskaźników PPD i LPPD, co oznacza "Przewidywany Odsetek Niezadowolonych" i "Najmniejszy Możliwy Odsetek Niezadowolonych". Na wartość tego wskaźnika wpływają "Przewidywane Średnie Oceny" (PMV) uzyskane dla wybranych miejsc pomieszczenia.

Jako miarę wrażeń ciepłych przyjmuje autor siedmiostopniową psychofizyczną skalę ocen od -3 do +3. Wartość dodatnia odpowiada stronie ciepłej, a ujemna stronie zimnej. Te lokalne oceny określone są na podstawie uśredniania wartości parametrów ciepłych powietrza zmierzonych w wybranych miejscach wzdłuż wysokości, odpowiadających wzrostowi człowieka (wysokość strefy pracy).

Ocena warunków ciepłych w badanej hali metodą Fangera wypadła pomyślnie [11], a mianowicie:

Seria I - $PMV_{\bar{s}r} = 0,2974$; PPD = 7,29%, LPPD = 5,61%

Seria II - $PMV_{\bar{s}r} = 0,3327$; PPD = 7,49%; LPPD = 5,28%

Seria III - $PMV_{\bar{s}r} = -0,1122$; PPD = 5,62%.

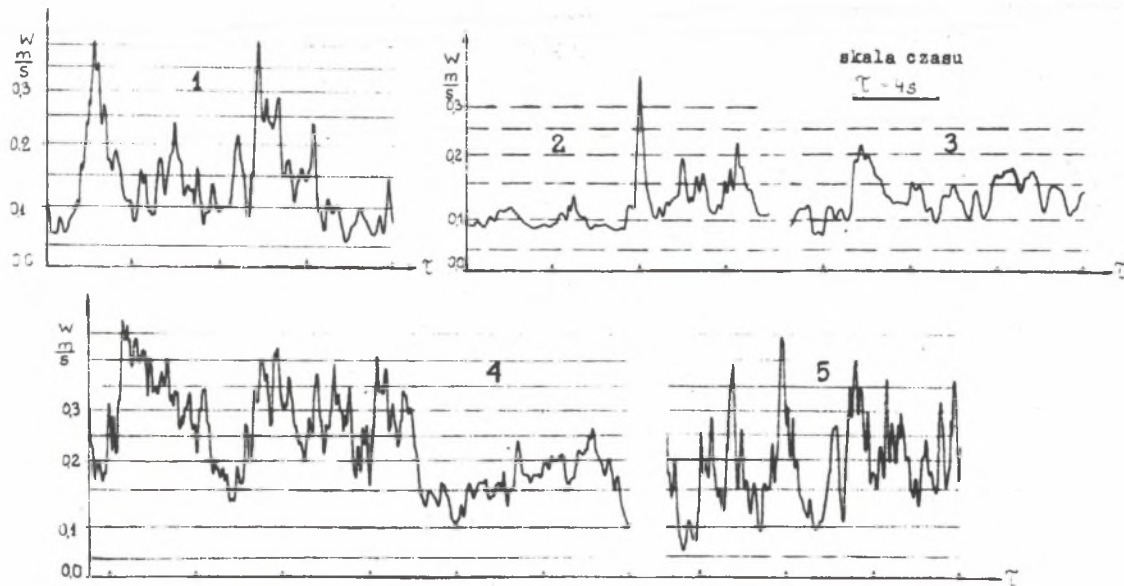
Wartość wskaźnika PPD mniejsza od dopuszczalnej $PPD_{dop} = 7,5\%$ a zbliżona do idealnej $PPD_{min} = 5\%$ charakteryzuje badane środowisko jako jednorodne pod względem ciepłym, co w rzeczywistości nie miało miejsca.

Przyczyną niewłaściwej interpretacji warunków ciepłych tą metodą jest uśrednianie temperatury i prędkości w pionie na wysokości człowieka. W przypadku badanej hali otrzymane lokalne oceny PMV dla poziomu nóg i głowy człowieka różniły się między sobą nawet znakami.

W tej sytuacji metoda Fangera powinna być uzupełniona dodatkowym warunkiem określającym dopuszczalne odchyłki temperatury i prędkości powietrza na wysokości strefy pracy w stosunku do ich średniej wartości.

Ujemny wpływ zróżnicowania czynników klimatycznych na wrażenia ciepłe człowieka został szczegółowo omówiony przez Klonowicza [12]. Zbyt duże takie zróżnicowanie przekracza możliwości termoregulacji człowieka i powoduje złe samopoczucie. Dlatego jako kryterium oceny efektów ogrzewania powietrznego przyjęto przede wszystkim równomierność temperatury i prędkości w strefie pracy.

W chwili obecnej wiele prac badawczych zmierza do ustalania dopuszczalnych zmian temperatury i prędkości powietrza przy zachowaniu granic komfortu cieplnego. Wg niektórych autorów nierównomierność rozkładu tempera-



Rys. 7. Przykład wyników pomiarów prędkości powietrza w strefie pracy wentylowanej hali

tury nie powinna przekraczać $2\frac{1}{2}$, 5 deg. Natomiast brak danych odnośnie do depuszczalnych granic zróżnicowania prędkości powietrza. Wiadomo tylko, że niewskazany jest bezruch powietrza w pomieszczeniu, a jego prędkości powyżej 0,25 m/s mogą być odczuwane jako przeciąg.

Doświadczenia wskazują, że rozkład prędkości (rys. 7) a także temperatury w strefach turbulentnego mieszania przy rozpraszaniu energii strumienia można traktować jako zjawiska stochastyczne i że rozkłady te swoimi właściwościami są zbliżone do rozkładu normalnego. Dlatego celowe jest przeprowadzenie oceny równomierności rozkładu tych parametrów w oparciu o statystykę matematyczną.

Statystyczną analizę szybkich stochastycznych zmian prędkości umożliwia stosowanie klasyfikatorów w układach pomiarowych [5]. Wyniki pomiarów można przedstawić w postaci wartości średniej i odchylenia standardowego lub graficznie w formie dystrybuanty.

Odchylenie standardowe temperatury σ_t i prędkości σ_w charakteryzuje zróżnicowanie parametru w badanym obszarze. Określa się je ze wzorów:

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{\sum (t_i - t_m)^2}{n}} \quad (4)$$

$$\sigma_w = \sqrt{\frac{\sum (v_i - v_m)^2}{n}} \quad (5)$$

Prawdopodobieństwo odchylenia parametrów powietrza od wartości średnich o założoną wielkość $P(x > x_{zał})$ określone jest za pomocą całki Laplace'a $\phi(z)$ przy znanym odchyleniu standardowym:

$$P(x > x_{zał}) = 0,5 - \phi(z) \quad (6)$$

$$\phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\xi^2/2} d\xi \quad (7)$$

gdzie:

z - oznacza bezwymiarową zmienną rozkładu normalnego.

Zmienną z w odniesieniu do temperatury (z_t) oraz prędkości (z_w) oblicza się następująco:

$$z_t = \frac{\Delta t}{\sigma_t}, \quad \Delta t = t_m - t \quad (8)$$

$$z_w = \frac{\Delta w}{\sigma_w}, \quad \Delta w = w_m - w \quad (9)$$

Za wskaźnik równomierności pola temperatury w strefie pracy przyjęto odchylenie standardowe; im większa jest jego wartość, tym większe jest zróżnicowanie temperatury. Przyjmując np. jako dopuszczalne odchylenie temperatury od wartości średniej $\Delta t_d = \pm 1$ deg, z prawdopodobieństwem przekroczenia tych odchyłeń o 5%, wartość dopuszczalnego odchylenia standardowego temperatury Gt_d wynosi:

$$Gt_d = \frac{\Delta t_d}{z_t} = \frac{1}{1,65} = 0,6 \text{ deg}$$

Obliczone powyżej dopuszczalne odchylenie przyjęto za pierwsze kryterium oceny równomierności rozkładu temperatury powietrza. Jako drugie kryterium przyjęto, że różnica temperatur powietrza na wysokości człowieka nie powinna przekraczać 2 deg w 90% pola powierzchni strefy pracy.

Dystrybuanty różnic temperatur na wysokości człowieka okazały się dogodną formą do oceny warunków cieplnych za pomocą drugiego kryterium. Warto nadmienić, że przy wykreśleniu dystrybuanty na podstawie wyników pomiarów można uzyskać charakterystyczne parametry rzeczywistego rozkładu bez przyjmowania rozkładów zastępczych, np. normalnego.

Sprawę uwzględnienia prędkości powietrza w kryteriach oceny efektów różnych rozwiązań układów nawiewnych pozostawiono na razie otwartą z podanych poprzednio powodów.

4. Statystyczna ocena rozkładu temperatury powietrza w badanej hali

Zebrany w trakcie omawianych badań obszerny materiał pomiarowy pozwala na zastosowanie metod analizy statystycznej.

Wartości średnie i odchylenia standardowe parametrów powietrza określono dla dwóch interesujących z punktu widzenia warunków cieplnych poziomów w hali, a mianowicie: dla poziomu nóg (wysokość 0,1 m od podłogi) oraz poziomu głowy człowieka (wysokość 1,7 m); odpowiednie dane uzyskane w trakcie badań zestawiono w tabeli 3.

Zróżnicowanie parametrów powietrza oraz prawdopodobieństwo przekroczenia założonych ich wartości można obliczyć lub odczytać bezpośrednio z dystrybuanty.

Na rys. 8 przedstawiono dystrybuanty prędkości i temperatury powietrza na poziomie nóg i głowy oraz dystrybuantę różnic temperatur powietrza na wysokości człowieka według wyników pomiarów I i III serii. Dotyczą one zatem okresu przejściowego w ogrzewnictwie, charakteryzowanego temperaturą zewnętrzną od -5°C do $+5^{\circ}\text{C}$.

Na podstawie analizy krzywych przedstawionych na rys. 8 okazuje się, że przy ogrzewaniu powietrznym w badanej hali występowało większe zróżni-

Tabela 3

Wyniki pomiarów temperatury i prędkości powietrza
w strefie pracy hali

Pozycja	Wyszczególnienie	Symbol	Wymiar	Seria nr		
				I	II	III
1	2	3	4	5	6	7
1	Średnia temperatura powietrza na poziomie głowy człowieka	t_{mg}	$^{\circ}\text{C}$	18,8	20,0	17,3
2	Średnia temperatura powietrza na poziomie nóg człowieka	t_{mn}	$^{\circ}\text{C}$	17,4	19,7	15,5
3	Odchylenie standardowe temperatury powietrza na poziomie nóg	σt_n	deg	1,78	2,48	4,13
4	Odchylenie standardowe temperatury powietrza na poziomie głowy	σt_g	deg	1,01	2,58	1,36
5	Różnica temperatur powietrza w pionie między poziomem głowy i nóg przy prawdopodobieństwie wystąpienia większych różnic 10% (wg dystrybuanty)	Δt_{g-n} $P = 10\%$ ($\Delta t > \Delta t_{g-n}$)	deg	2,9	3,0	5,0
6	Średnia prędkość powietrza na poziomie nóg	w_{mn}	m/s	0,25	0,7	0,55
7	Średnia prędkość powietrza na poziomie głowy	w_{mg}	m/s	0,31	0,6	0,45
8	Odchylenie standardowo prędkości powietrza na poziomie nóg	σw_n	m/s	0,28	0,47	0,45
9	Odchylenie standardowe prędkości powietrza na poziomie głowy	σw_g	m/s	0,15	0,48	0,45

owanie temperatur na poziomie nóg aniżeli na poziomie głowy. Świadczą o tym nachylenia odpowiednich dystrybuant:

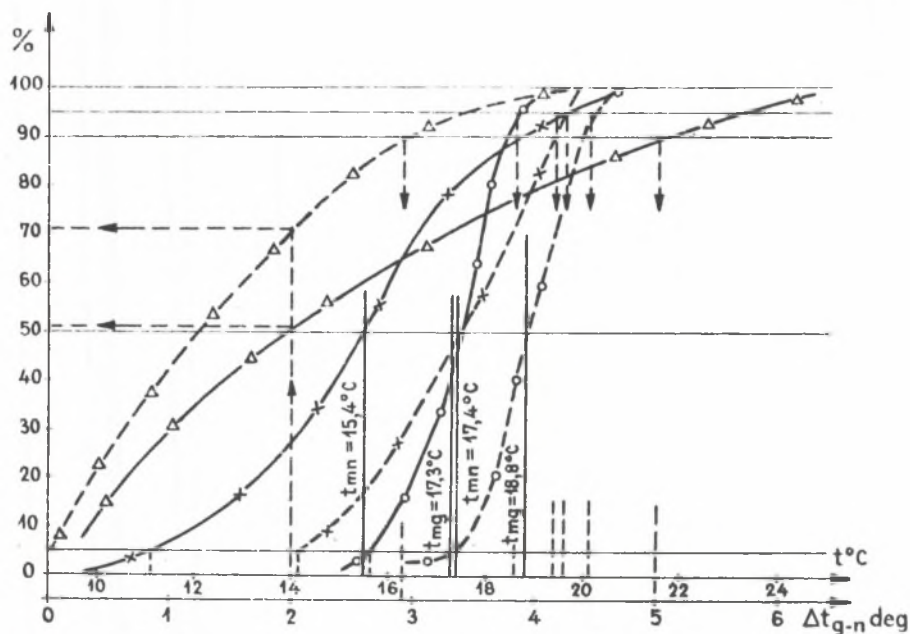
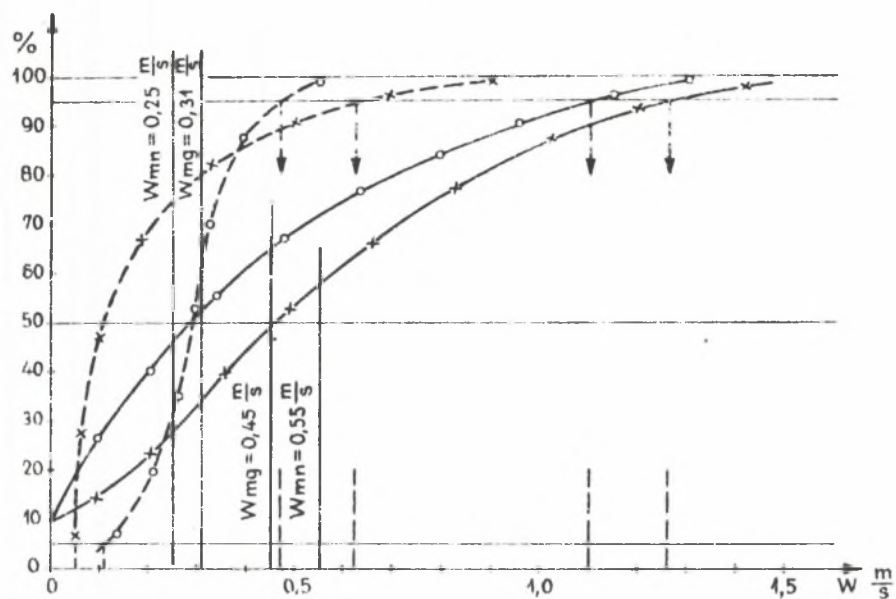
- dla poziomu nóg różnica temperatur powietrza przy poziomie ufności 90% (pomiędzy 5% i 95%) wynosiła:

dla serii I 5,3 deg, $t_n = 19,4-14,1^{\circ}\text{C}$

dla serii III 8,5 deg, $t_g = 19,6-11,1^{\circ}\text{C}$.

Wyznaczone dla poziomu ufności 90% (od 0 do 90%) różnice temperatur na wysokości człowieka wynosiły 3÷5 deg.

Z rys. 8 można również określić udział przestrzeni strefy pracy, w której są zachowane różnice temperatur dopuszczalne z punktu widzenia komfortu cieplnego.



Rys. 8. Dystrybuanty prędkości i temperatur powietrza

--- w serii I, — w serii III, x - na poziomie nóg człowieka, o - na poziomie głowy człowieka, Δ - różnic temperatur powietrza na wysokości człowieka

Dla proponowanej przez Missenarda wartości 2 deg z dystrybuanty różnic temperatur na rys. 8 wynika, że w badanej hali komfort cieplny był spełniony w 50% przestrzeni strefy pracy w okresie pomiarów serii III, a w 70% przestrzeni w czasie serii I.

Przebieg dystrybuant prędkości sporządzonych dla serii III świadczy o większym zróżnicowaniu i większych prędkościach powietrza na poziomie nóg aniżeli na poziomie głowy przy kierowaniu strumienia nawiewanego do strefy pracy. Przy tym prędkość powietrza wahała się od wartości znikomych, odpowiadających bezruchowi powietrza, do około 1,5 m/s.

Natomiast przy kierowaniu strumienia ponad strefę pracy nie obserwowano w tej strefie całkowitego bezruchu powietrza, a jednocześnie rozkład prędkości był bardziej wyrównany i korzystniejszy, gdyż prędkość nie przekraczała 0,5 m/s. Ponadto prędkości powietrza na poziomie nóg były mniejsze aniżeli na poziomie głowy, co również poprawiało warunki cieplne.

Omówione powyżej zróżnicowania rozkładu temperatury i prędkości powietrza potęgowały się w miarę obniżania się temperatury zewnętrznej.

5. Wnioski

W oparciu o wyniki omówionych powyżej badań można stwierdzić co następuje:

1. W hali ogrzewanej tradycyjnie za pomocą aparatów ogrzewczo-wentylacyjnych, produkowanych dotychczas w kraju, powstają w strefie pracy bardzo nierównomierne rozkłady prędkości i temperatury powietrza. Z punktu widzenia komfortu cieplnego poziome i pionowe zróżnicowanie tych parametrów jest zbyt duże.
2. Sposób nawiewania powietrza wpływa na stopień zróżnicowania wartości parametrów cieplnych strefy pracy. Przy nawiewaniu ogrzewającego powietrza bezpośrednio do tej strefy uzyskuje się gorsze rezultaty aniżeli przy kierowaniu strumienia ponad strefę równoległe do podłogi.
3. Wydatek i prędkości nawiewu aparatów ogrzewczo-wentylacyjnych są za małe dla zorganizowania tam pożądanego rozkładu temperatury powietrza. Wynika to przede wszystkim stąd, że w produkowanych obecnie aparatach wydatek powietrza jest za mały w stosunku do ich mocy cieplnej. W związku z tym nie ma możliwości właściwego zorganizowania rozkładu temperatury powietrza bez przegrzewania hali.
4. Przy wyłącznie powietrznym ogrzewaniu hali trudno jest zapobiec powstawaniu przyściennej chłodnej strefy (o zasięgu od 5÷15 m w głąb hali). Jej zasięg zależy od temperatury przegrody zewnętrznej, a więc od jej własności cieplnych oraz od szczelności jej wykonania.
5. Określenie właściwych parametrów ogrzewania powietrznego oraz wpływu na jego efektywność zakłóceń pochodzących od konstrukcji, szczelności i własności cieplnych hali oraz procesu technologicznego, wymaga przeprowadzenia badań modelowych.

6. Ocena warunków cieplnych w pomieszczeniu w oparciu o uśrednione wartości parametrów w rzeczywistych warunkach pomieszczeń, zwłaszcza przemysłowych, może prowadzić do błędnych wniosków. Metody oceny tych warunków powinny być uzupełnione dodatkowym kryterium ograniczającym odchyłki temperatury i prędkości powietrza od wartości średnich.
7. Dla uzyskania w pomieszczeniu dogodnych warunków cieplnych za pomocą kształtowania rozdziału powietrza wentylacyjnego wystarczającym kryterium jest równomierność rozkładu temperatury i prędkości powietrza w stosunku do wartości średnich, które można określić z równania komfortu cieplnego.

LITERATURA

- [1] Praca zbiorowa: Rozpoznanie potrzeb przemysłu w zakresie tematu, studia i opracowanie programu badań. Etap 1,1 podtematu: Ogrzewanie powietrzne hal przemysłowych. Praca zlecona Instytut Inż. Ochrony Środowiska. Pol. Śl., Gliwice 1974.
- [2] Surowiec A., Walotek K.: Analiza zmienności strat ciepła hal przemysłowych w zależności od wielkości obiektu. Praca dyplomowa. Zakład Ogrz. Went. i Ochr. Atm., Pol. Śl. 1973.
- [3] Rietschel - Rais: Ogrzewanie i klimatyzacja. Arkady, Warszawa 1973.
- [4] Turkiewicz K.: Analiza rozkładu temperatury powietrza w pomieszczeniach przy nawiewaniu strumieni nieizotermicznych. Praca doktorska. Zakład Ogrz. Went. i Ochr. Atm. Pol. Śl., Gliwice 1976.
- [5] Kolasa C., Soehrich E., Turkiewicz K.: Fizyczny model do badań ogrzewania powietrznego dużych pomieszczeń. ZN Pol. Śl. Inż. Sanit. (w druku).
- [6] Mierzwiński S., Soehrich E., Turkiewicz K., Warchoń E.: Kształtowanie warunków cieplnych przy ogrzewaniu powietrznym. ZN Pol. Śl. Inż. Sanit. (w druku).
- [7] Andjulovici Al., Georgescu St.: Komfort cieplny w budynkach Arkady, Warszawa 1971.
- [8] Bradtke F., Liese W.: Pomiary klimatyczne wewnątrz i na zewnątrz budynków. Arkady, Warszawa 1958.
- [9] Mielnicki J.S.: Centralne ogrzewanie, regulacja i eksploatacja. Arkady, Warszawa 1974.
- [10] Fanger P.O.: Komfort cieplny. Arkady, Warszawa 1974.
- [11] Bazanek I.: Ocena metodą Fangera warunków cieplnych hali przemysłowej ogrzewanej powietrzem. Praca dyplomowa. Zakład Ogrz. Went. i Ochr. Atm. Pol. Śl., Gliwice 1975.
- [12] Klonowicz St.: Mikroklimat, człowiek, środowisko. Ogrzewanie i Wentylacja 4, Arkady, Warszawa 1974.

ОЦЕНКА ТЕПЛОВЫХ УСЛОВИЙ В ЗАВОДСКОМ ЗАЛЕ
ПРИ ВОЗДУШНОМ ОТОПЛЕНИИ

Р е з ю м е

В рамках подготовительных работ для серии модельных испытаний повышения эффективности воздушного отопления больших помещений проведены испытания тепловых условий в заводском зале. Представлены диаграммы температурных полей и эпюры скоростей воздуха, а также температурного излучения в заводском зале, затем предложены критерии оценки тепловых условий рабочей зоны, опираясь на математическую статистику.

THE ESTIMATION OF HEAT CONDITIONS
IN AN AIR HEATED PRODUCTION ROOM

S u m m a r y

In the framework of preparatory works to the series of model research on the increase of efficiency of big rooms heating, the investigation of heat conditions in a production room has been performed. The temperature field diagrams, air velocity and room radiation temperature diagrams have been presented, and further on, basing on the mathematical statistics, the criterions of estimation of heat conditions of the work zone have been proposed.