

Cezary KOLASA, Eryk SOEHRICH,
Krystyna TURKIEWICZ

FIZYKALNY MODEL DO BADAŃ OGRZEWANIA POWIETRZNEGO DUŻYCH POMIESZCZEŃ

Streszczenie. Omówiono problematykę badawczą ogrzewań powietrznych. Szczegółowo omówiono konstrukcję i sposób wykonania fizykalnego modelu do badania rozkładu temperatury i prędkości powietrza w hali przy ogrzewaniach powietrznych. Opisano również wyposażenie aparaturowe stanowiska badań modelowych oraz zakres możliwości wykorzystania modelu.

1. Wstęp

Dla dużych hal przemysłowych najodpowiedniejsze są ogrzewania powietrzne. Biorąc pod uwagę nieefektywność ich działania zastanowiono się, jak można wyeliminować niewłaściwe i zróżnicowane warunki cieplne w strefie pracy oraz niewskazane energetycznie przegrzanie górnych stref hali [1, 2]. Punktem wyjścia był pogląd, że wyrównanie temperatury w całej hali względnie w jej rozpatrywanej części wymaga przewyciężenia naturalnego wyporu grawitacyjnego strumienia cieplejszego powietrza. Można to osiągnąć drogą aerodynamicznego mieszania powietrza [3].

Ekonomiczne wartości parametrów energetycznych strumieni nawlewnych oraz sposób rozmieszczania otworów nawlewnych w obłokcie są niewiadomymi, które należy ustalić dla różnych rozwiązań ogrzewań powietrznych.

Badania mające na celu ustalenie wyżej wymienionych danych przeprowadzono na fizykalnym modelu.

Koncepcja i konstrukcja stanowiska modelowego są tematem niniejszego artykułu.

2. Czynniki wpływające na proces ogrzewania powietrznego hali przemysłowej

Przy wykonywaniu projektu modelu uwzględniono szereg zmiennych, które mają wpływ na kształtowanie warunków cieplnych w strefie pracy przy ogrzewaniu powietrznym, a mianowicie:

geometryczne

- wymiary hali,
- kształt i uzbrojenie nasadki nawiewnej,
- wymiary nasadki,
- miejsce usytuowania nasadek nawiewnych względem ścian obiektu: nawiew od stropu, nawiew boczny (od strony ścian zewnętrznych od osi hali), wysokość podwieszenia,
- ilość otworów nawiewnych w odniesieniu do kubatury,
- usytuowanie otworów wywiewnych w stosunku do nawiewnych;

energetyczne

- własności cieplne przegród zewnętrznych i sposób ich rozmieszczenia w obiekcie,
- infiltracja powietrza zewnętrznego: ilość, temperatura,
- wydatek powietrza nawiewanego,
- prędkość wylotowa powietrza nawiewanego,
- temperatura początkowa powietrza nawiewanego.

Model konstruowano w ten sposób, ażeby wpływ ww. czynników można było określić w szerokim zakresie.

3. Konstrukcja modelu

3.1. Zasady modelowania

Teoretyczne podstawy fizykalnego modelowania, oparte na teorii podobieństwa i zasadzie przybliżonego fizykalnego modelowania, związane z samomodelującym przebiegiem niektórych zjawisk, są znane w literaturze [4, 5, 6] i nie potrzeba ich ponownie analizować. W rozważanym przypadku (oddziaływania nieizotermicznych strumieni powietrza na rozkład prędkości i temperatury w ograniczonej przestrzeni) zasady przybliżonego fizykalnego modelowania wymagają spełnienia w modelu i naturalnym obiekcie równości liczb Archimedesesa i dotrzymania warunków samomodelowania [4].

Samomodelowanie strumieni wymuszonych występuje w przypadku utrzymania burzliwego ruchu powietrza, tj. przy liczbach $Re \geq Re_g$. Dla wypływu powietrza z otworów prostokątnych i okrągłych można przyjąć $Re_g = 2400$, a dla wypływu z otworów wąskich $Re_g = 1200$.

Zdolność samomodelowania konwekcji swobodnej w ruchu burzliwym występuje przy wartościach iloczynu [7]:

$(Gr.Pr) > 2 \cdot 10^7$ - dla ściany pionowej, cylindra pionowego (wg Michieje-wa),

$(Gr.Pr) > 2 \cdot 10^7$ - dla płyty poziomej, oddającej ciepło ku górze (wg Fischendena i Saundersa),

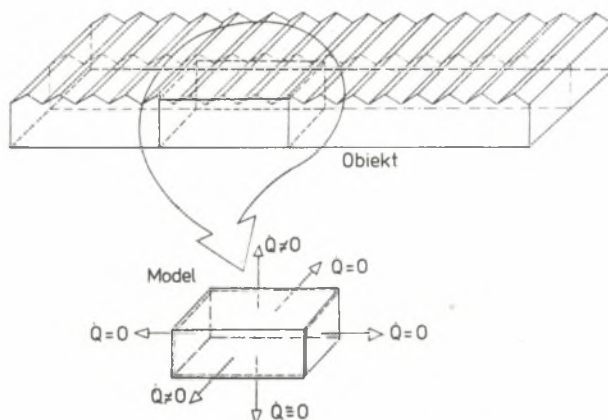
$(Gr.Pr) > 3 \cdot 10^{10}$ - dla płyty oddającej ciepło w dół (wg Fischendena i Saundersa oraz Browna i Marco).

3.2. Dobór skal modelowania

Skale modelowania dobrano kierując się następującymi względami:

- utrzymaniem w modelu warunków samomodelowania przepływów wymuszonych i konwekcji swobodnej,
- uzyskaniem dostatecznie dokładnych wyników pomiarów prędkości przepływu powietrza przy użyciu dostępnej aparatury pomiarowej.

Spełnienie tych warunków było możliwe przy przyjęciu skal liniowych 1:15, 1:10 i większych. Biorąc pod uwagę, że obiekt modelowany (hala przemysłowa) ma duże rozmiary, rzędu 200 x 100 x 10 m, otrzymano by model o wymiarach dużego pomieszczenia. W podjętych badaniach wykorzystano stwierdzoną w obiekcie naturalnym (rozdział 4) powtarzalność zjawisk aerodynamiczno-ciepłnych w każdym segmencie hali i przyjęto do wykonania model wycinka hali, zaznaczony na rysunku 1.



Rys. 1. Zamodelowany wycinek hali

Wymaganą stratę ciepła do otoczenia modelu umieszczonego w pomieszczeniu laboratoryjnym zapewniono przez podniesienie w nim temperatury powietrza w granicach 45–50°C, co spowodowało konieczność wprowadzenia odpowiedniej skali gęstości.

Skalę różnic temperatur powietrza założono $S_{\Delta t} = 1$.

W ten sposób skompletowano zestaw następujących czterech wielkości podstawowych, dla których można było przyjąć skalę:

- długości $S_l = 0,1; 0,0667$,
- różnicę temperatur $S_{\Delta t} = 1$,
- gęstość $S_\rho = 0,909$,
- przyspieszenie ziemskie $S_g = 1$.

Skale pozostałych wielkości fizycznych wyznaczono na podstawie równań fizycznych. Skale te przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

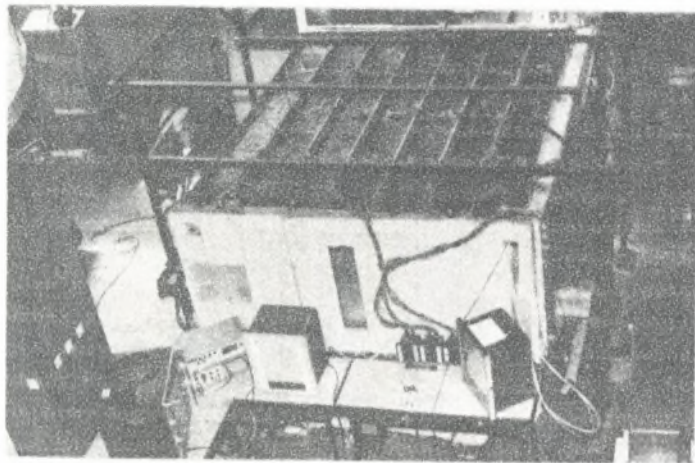
Skale do modelowania ogrzewań powietrznych

Po- zy- cja	Skala	Oznaczenia	Wartości		Uwagi
			4	5	
1	2	3	4	5	6
1	Długości	$S_l = \frac{l''}{l'}$	0,0667	0,1	Przyjęto
2	Różnica temperatur	$S_{\Delta t} = \frac{\Delta t''}{\Delta t'}$	1	1	Przyjęto
3	Gęstości	$S_Q = \frac{\rho''}{\rho'}$	0,909	0,909	Równania Clapey- rona dla $t'' = 45-50^\circ\text{C}$ $t' = 15^\circ\text{C}$
4	Prędkości	$S_w = S_l^{1/2} S_{\Delta t}^{1/2} S_Q^{1/2}$	0,246	0,301	Z warunku $Ar' = Ar''$
5	Objętościowego natężenia przepływu	$S_V = S_l S_{\Delta t} S_Q^{1/2}$	0,00109	0,00301	
6	Strumienia masy	$S_m = S_l^{5/2} S_{\Delta t}^{1/2} S_Q^{3/2}$	0,00099	0,00274	
7	Częstotliwości wymian powietrza	$S_Z = S_l^{-1/2} S_{\Delta t}^{1/2} S_Q^{1/2}$	3,68	3,02	
8	Strumienia ciepła asymilowanego	$S_{Q_N} = S_l^{5/2} S_{\Delta t}^{3/2} S_Q^{3/2}$	0,00099	0,00274	
9	Strumienia ciepła konwekcyjnego	$S_{Q_k} = S_l^2 S_B^{4/3} \Delta t_k$	0,00099	0,00274	$S_B = \frac{B' \text{ przy } t_m}{B' \text{ przy } t_m} = \frac{40^\circ\text{C}}{5^\circ\text{C}}$
10	Energii kinetycznej strumienia powietrza	$S_E = S_l^{7/2} S_{\Delta t}^{3/2} S_Q^{5/2}$	0,00006	0,00024	
11	Jednostkowej energii kinetycznej strumienia powietrza	$S_e = S_l^{1/2} S_{\Delta t}^{3/2} S_Q^{5/2}$	0,202	0,24	
12	Konwekcyjnej różnicy temperatur	$S_{\Delta t_k} = S_l^{3/8} S_{\Delta t}^{9/8} S_Q^{9/8} S_B^{3/4}$	0,343	0,4	$S_{Q_k} = S_{Q_N}$
13	Współczynnika wnikania ciepła	$S_{\alpha_k} = S_l^{1/8} S_{\Delta t}^{3/8} S_Q^{3/8} S_B^{-3/4}$	0,750	0,783	$\alpha_k = B(t - t'')^{1/3}$

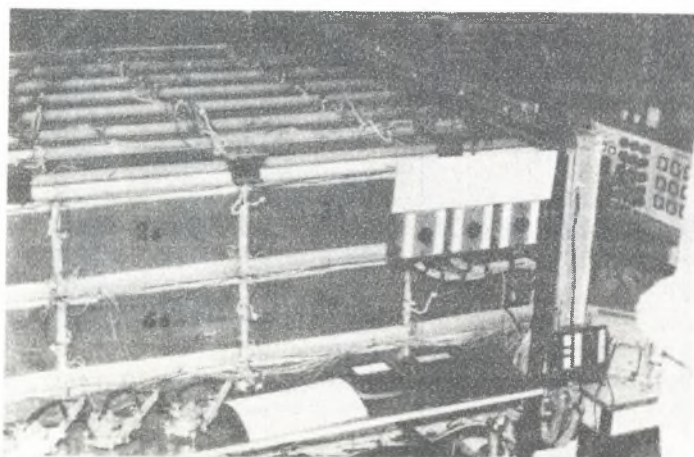
3.3. Opis stanowiska do badań modelowych

Dla realizacji badań w zakresie przedstawionym w p. 2 skonstruowano model dwusegmentowego odcinka hali. Wymiary tego modelu wynosiły:

długość ściany zewnętrznej 2,4 m,
maksymalna szerokość 2,1 m,
maksymalna wysokość 0,9 m.



Rys. 2. Widok stropu i ściany modelującej warunki brzegowe modelu. Na pierwszym planie widoczna aparatura do pomiaru prędkości i temperatur powietrza



Rys. 3. Widok modelu od strony ściany zewnętrznej

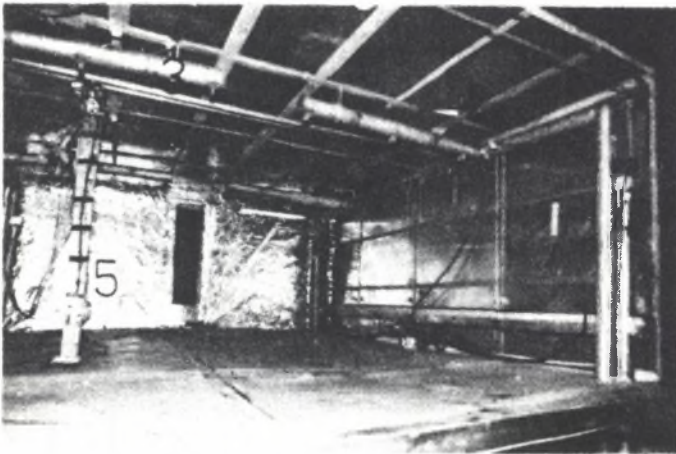
Widok modelu przedstawiają rysunki 2 i 3. Jego konstrukcja pozwala na modelowanie różnych strat ciepła do otoczenia przez ścianę zewnętrzną, strop i podłogę. W ten sposób można analizować warunki cieplne wnętrza, odpowiadające różnym budowlanym rozwiązaniom tych przegród odnośnie do ich ocieplenia i powierzchni oszklenia. Przegrody te wykonano z segmentów. Ustalenie różnych jednostkowych strumieni strat ciepła umożliwia element grzejny umieszczony wewnątrz segmentu przegrody.

Zasadniczym elementem segmentu przegrody jest warstwa izolacji o wyznaczonym laboratoryjnie oporze przewodzenia ciepła R , która została tak dobrana, aby zapewnić mierzalną różnicę temperatur po obu jej stronach przy modelowaniu minimalnych strat ciepła.

Jednostkową stratę ciepła określa się ze wzoru:

$$q'' = \frac{1}{R} (\psi'' - \psi_x) \quad (1)$$

Temperatury ψ'' i ψ_x po obu stronach warstwy ocieplenia mierzy się w modelu termoparami. Zmierzona temperatura ψ'' przeliczona przez skalę $S_{\Delta t_k}$ odpowiada temperaturze wewnętrznej powierzchni przegród zewnętrznych w naturalnym obiekcie ψ :



Rys. 4. Widok wnętrza modelu

1 - nasadki infiltracyjne, 2 - nasadki eksfiltracyjne, 3 - nasadki nawiewne, 4 - nasadki wywiewne, 5 - manipulator (rys. 7)

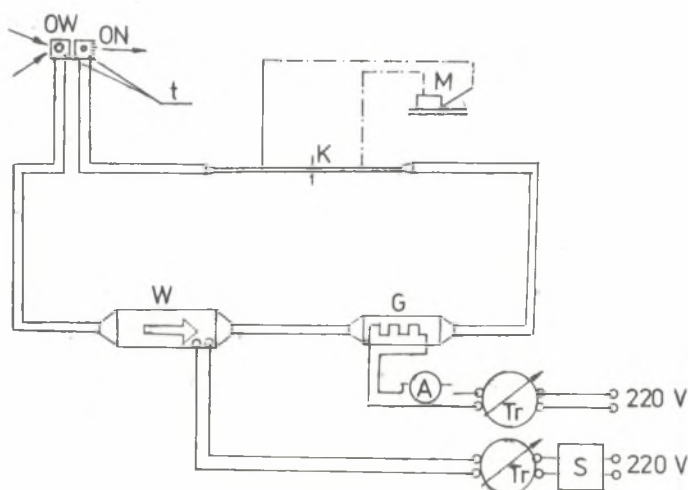
W analizie wpływu infiltracji powietrza zewnętrznego na warunki cieplne strefy pracy istotną sprawą jest rozpoznanie wzajemnego oddziaływania strumieni powietrza nawiewanego i infiltrującego oraz ich rozprzestrzenienia się w hali. W tym celu przygotowano specjalny układ infiltracyjny pozwalający na dostarczenie do modelu odpowiedniej ilości powietrza zewnętrznego o regulowanej temperaturze.

Infiltrację powietrza zewnętrznego do hali umożliwia specjalny układ, w skład którego wchodzi:

- wentylator o regulowanej wydajności,
- chłodnica powietrze - woda (o regulowanej wydajności w zakresie przepływu),
- odcinek pomiarowy wydajności powietrza,
- nasadki infiltracyjne (rys. 4).

W skład układu eksfiltracyjnego wchodzi:

- wentylator o regulowanej wydajności,
- odcinek pomiarowy wydajności powietrza,
- nasadki eksfiltracyjne (rys. 4).



Rys. 5. Schemat układu nawiewno-wywiewnego

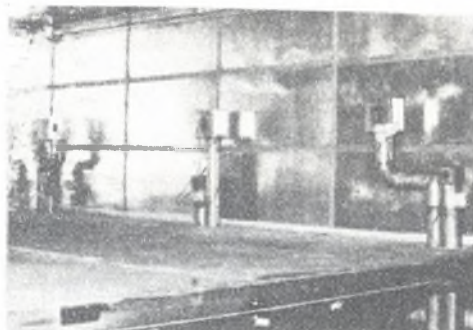
W - wentylator, G - grzałka, Tr - autotransformator, A - amperomierz, S - stabilizator, K - kryza pomiarowa, M - mikromanometr, ON, OW - wymienne nasadki nawiewno-wywiewne, t - miejsce pomiaru temperatury

Ściany boczne modelu, których nie ma w naturalnym obiekcie, należało wykonać w ten sposób, aby temperatura ich wewnętrznej powierzchni była równa temperaturze powietrza w modelu. Warunek ten zrealizowano za pomocą drewnianej konstrukcji ogrzewanej powietrzem.

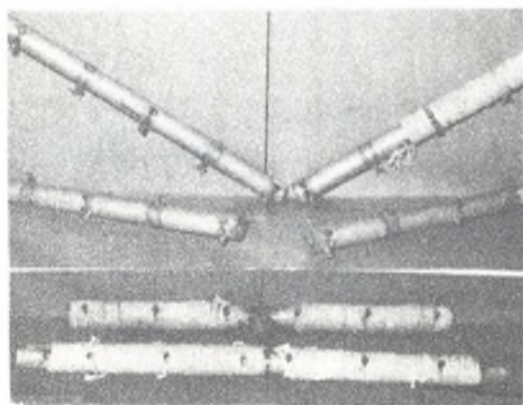
a.



b.



c.



Rys. 6. Widok nasadek nawiewnych w modelu

a - do serii badań nawiewu od osi hali w kierunku ściany zewnętrznej:
 l = 6 m, b - do serii badań nawiewu od ściany zewnętrznej do wnętrza hali:
 l = 8 m, c - nasadki stosowane przy badaniu nawiewów od strony stropu

Obserwacje wnętrza modelu w trakcie pomiarów umożliwiają podwójne ogrzewane okna. Zawieszenie ścian bocznych na zawiasach pozwala na wejście do modelu.

Schemat układu nawiewno-wywiewnego przedstawiono na rys. 5. W skład układu pracującego przy recyrkulacji powietrza wchodzi:

- wentylator o regulowanej wydajności,
- nagrzewnica powietrza o regulowanej wydajności cieplnej,
- odcinek pomiarowy wydajności powietrza,
- wymienne nasadki nawiewne i wywiewne (rysunek 6).

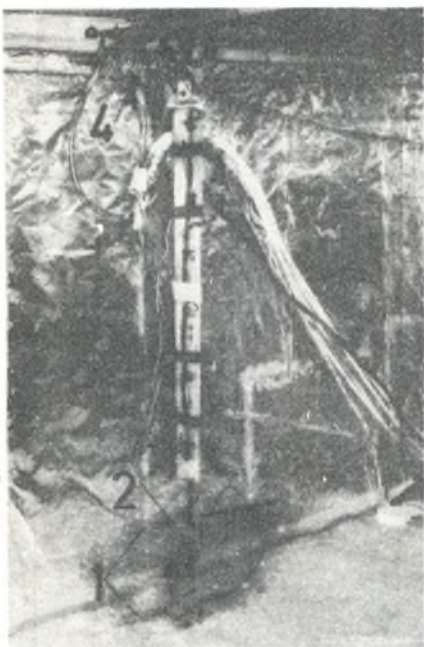
Według takiego schematu zestawia się układy ogrzewcze o różnym rozmieszczeniu otworów nawiewnych.

Pomiaru temperatury powietrza nawiewanego, wywiewanego i przegród dokonuje się za pomocą termoelementów miedź - konstantan. Temperaturę odniesienia utrzymuje się na żądanym poziomie za pomocą ultratermostatów. Jako miernika siły termoelektrycznej użyto kompensatora rejestrująco-wskazującego.

Do pomiaru ilości powietrza nawiewanego użyto przecechowanej kryzy.

Błąd określania wydatku powietrza wynika z dokładności odczytu z mikromanometru oraz dokładności odczytu z charakterystyki kryzy. Błąd ten określono na $0,14 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$.

Wykonanie pomiarów temperatury i prędkości powietrza w zamkniętym modelu umożliwia specjalnie skonstruowany manipulator, sterowany z zewnątrz (rys. 7). Na wysięgniku tego manipulatora umieszczony jest zestaw termopar miedź - konstantan oraz czujniki termoanemometryczne. Siła termoelektryczna termopar rejestrowana jest przez automatyczny 12-punktowy



Rys. 7. Manipulator

1 - czujniki termoanemometru do pomiaru prędkości powietrza, 2 - termopary do pomiaru temperatury powietrza, 3 - suwnica, 4 - wózek napędowy

kompensator wskazująco-rejestrujący typu MK.

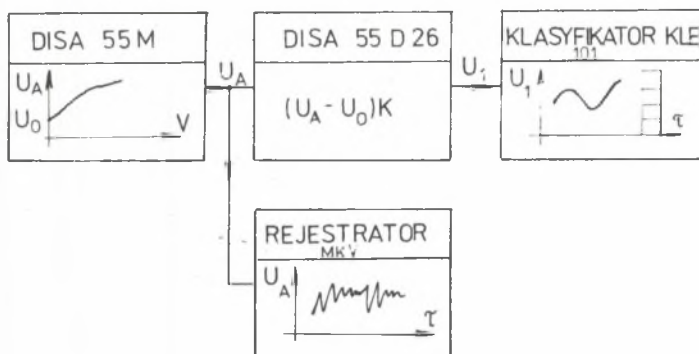
Błąd bezwzględny pomiaru temperatury powietrza w modelu określono na $\pm 0,2 \text{ deg}$.

Do pomiaru prędkości powietrza użyto termoanemometrów DISA systemu 55-M-DISA z symetrycznym mostkiem stałotemperaturowym 55 M 12. Z dostępnych czujników tej firmy wybrano miniaturowe czujniki z kompensacją tem-

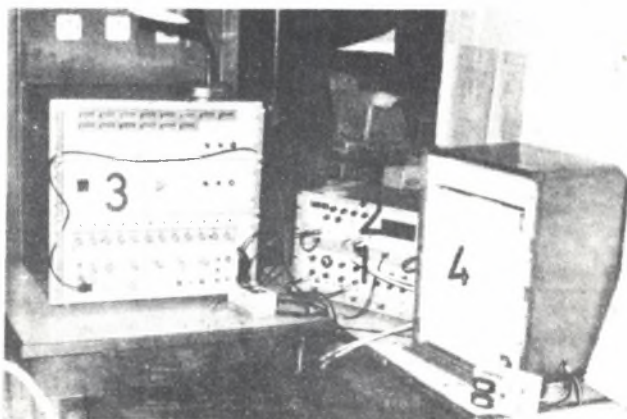
peratury typu 55 P 81. Dla ochrony czujników przed uszkodzeniami mechanicznymi zaprojektowano osłony. Termoanemometr z czujnikami i ich osłonami musi być poddawany wzorcowaniu po 24-48 godz. pracy modelu.

Napięcie wyjściowe z anemometru jest wzmacniane w przetworniku sygnałów 55 D 26 DISA, a następnie wprowadzone do klasyfikatora KLE 101. Klasyfikator ten umożliwia statystyczną analizę szybkich stochastycznych pulsacji prędkości. Napięcie pomiarowe jest tam porównywane z dwunastoma nastawialnymi poziomami napięciowymi (granice klas) według pięciu różnych programów.

Do rejestracji czasowego przebiegu sygnału prędkości w różnych punktach modelu hali sygnał napięciowy z termoanemometru jest również podawany na rejestrator $U_A - \tau$. Powyższy układ pomiarowy zilustrowano na rysunkach 8 i 9.



Rys. 8. Schemat układu do pomiaru prędkości powietrza



Rys. 9. Zestaw aparatury do pomiaru prędkości powietrza

1 - kable łączące czujniki prędkości umieszczone w modelu z termoanemometrem DISA, 2 - zestaw termoanemometru DISA, 3 - klasyfikacja KLE, 4 - rejestrator prędkości $U_A - \tau$

Czas pomiaru prędkości w jednym punkcie wynosił 80 s. Generator wewnętrzny klasyfikatora ustawiono na wyzwalanie impulsów z częstotliwością 100 Hz. Stąd ilość pobieranych próbek prędkości powietrza w punkcie wynosi 8000. W tym czasie rejestrator $U_A - \tau$ rejestruje zmienność prędkości powietrza w tym punkcie. Czas pomiaru prędkości determinuje czas trwania wszystkich pomiarów. W zależności od ilości punktów pomiarowych, stosowanych w różnych seriach, jeden komplet wyników otrzymuje się w czasie 5760-8320 s, a ilość pobranych danych wynosi 576000-832000.

Odpowiednio długi czas realizacji i częstotliwości próbkowania pozwala na określenie średniej prędkości powietrza w danym punkcie z błędem granicznym, oszacowanym na $\pm 20\%$. Błąd ten jest błędem systematycznym, a jego wielkość zależy od kierunku wektora prędkości średniej w stosunku do usytuowania czujnika termooanemometru [8].

Błąd określania średniej prędkości powietrza na danym poziomie strefy pracy, z uwagi na stochastyczny charakter zjawisk tam występujących, wynosi $\pm 2\%$. Uwzględniając możliwość wystąpienia błędu systematycznego dla całego poziomu strefy pracy, ostatecznie oszacowano błąd popełniony przy wyznaczaniu średniej prędkości powietrza na $\pm 5\%$.

3.4. Zakres wykorzystania modelu

Za pomocą opracowanego modelu można przeprowadzać badania warunków ogrzewania powietrznego i wentylacji hal w następującym zakresie:

- wymiary maksymalne hali:

szerokość - 60 m,

wysokość - 12 m,

- współczynniki przenikania ciepła przegród zewnętrznych:

$$0,8 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \text{h deg}} \text{ do } 6 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \text{h deg}},$$

- infiltracja powietrza zewnętrznego:

$$Z_1 = 0,5 - 6 \text{ m}^3/\text{h m}^3 \text{ hali},$$

- najniższa temperatura powietrza infiltrującego

35 deg niższa od temperatury w hali,

- dowolne rozwiązania nasadek nawiewnych i wywiewnych,

- dowolne miejsca usytuowania tych nasadek,

- ilość powietrza nawiewanego:

$$Z = 2-10 \text{ m}^3/\text{h m}^3 \text{ hali},$$

- prędkość powietrza nawiewanego $w_N = 5-20 \frac{\text{m}}{\text{s}}$,

- najwyższa temperatura powietrza nawiewanego o 40 deg wyższa od temperatury w hali.

Model ten może być wykorzystany do badań efektywności działania projektowanych rozwiązań ogrzewań powietrznych (w szerokim zakresie) przed ich pójściem do realizacji.

LITERATURA

- [1] Turkiewicz K., Legieć St., Soehrich E., Kolasa C.: Warunki cieplne wytwarzane przez aparaty ogrzewczo-wentylacyjne w obiekcie rzeczywistym. Zakład Ogrzew.Went. i Ochr.Atm., Pol. Śl. Gliwice 1972.
- [2] Praca zbiorowa: Podtemat 1. Ogrzewanie powietrzne hal przemysłowych. Etap 1.4. Kompleksowe pomiary warunków ogrzewania powietrznego w wybranych halach przemysłowych. Zakład Ogrz. Went. i Ochr. Atm. Pol. Śl. Gliwice 1976.
- [3] Turkiewicz K.: Analiza rozkładu temperatury powietrza w pomieszczeniach przy nawiewaniu strumieni nieizotermicznych. Praca doktorska, Biblioteka Pol. Śl. Gliwice 1976.
- [4] Mierzwiński S., Majerski St.: Modelowanie procesów wentylacji. Ogrzewanie i Wentylacja 2, Arkady, Warszawa 1972.
- [5] Miller L.: Teoria podobieństwa mechanicznego. WNT, Warszawa 1961.
- [6] Johnstone R.E., Thring M.W.: Instalacje doświadczalne, modele i metody powiększania skali. PWT, Warszawa 1960.
- [7] Hobler T.: Ruch ciepła i wymienniki. WNT, Warszawa 1968.
- [8] Hagel R.: Miernictwo dynamiczne. WNT, Warszawa 1975.

ФИЗИКАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ВОЗДУШНОГО ОТОПЛЕНИЯ
БОЛЬШИХ ПОМЕЩЕНИЙ

Р е з ю м е

Обсуждена испытательная проблематика воздушного отопления. Всесторонне представлены конструкция и способ изготовления физикальной модели для испытания распределения температуры и скоростей воздуха в заводском зале при воздушном отоплении. Описана также оснастка аппаратурой стенда модельных испытаний, а также объем возможностей использования модели.

THE PHYSICAL MODEL FOR TESTING BIG ROOMS AIR HEATING

S u m m a r y

The research problems of air heating have been discussed. The estimation and the way of carrying out of the physical model for testing temperature distribution and air velocity in an air-heated production house have been discussed in detail. The apparatus equipment of the model research stand has been described as well as the range of possibilities of model utilization.