

Stanisław Majerski, Antoni Dąbek

MODELOWE BADANIA ROZDZIAŁU POWIETRZA W AUDYTORIACH

1. Wprowadzenie

Dużą trudność z jaką spotyka się projektant wentylacji, polega na właściwym organizowaniu ruchu powietrza w pomieszczeniu wentylowanym. Trudno jest bowiem obecnie w fazie projektowania tak przewidzieć i opracować bieg powietrza w pomieszczeniu, gdzie występują różnorodne zakłócenia strumieni wentylacyjnych, aby uzyskać w strefie przebywania ludzi zalecane przez fizjologów warunki cieplne [1], [2], [4], [5], [6], [10]. Przyczyną tego jest niedostateczne dotąd rozeznanie zasad rozprzestrzeniania się strumieni powietrza w ograniczonej przestrzeni.

Do niedawna jako podstawę dla projektowania wentylacji i ustalania przebiegów strumieni powietrza przyjmowano teorię rozprzestrzeniania się strumieni swobodnych [2], [3], [12], co w wielu przypadkach było powodem nieskutecznego działania wentylacji.

W ostatnich latach przebiegi strumieni powietrza w ograniczonych pomieszczeniach stanowią przedmiot zwiększonej liczby opracowań, obliczeń i badań. Prace na ten temat prowadzili i opublikowali: Baturin [1], Link [3], [4], Koreńkow [7], Makalimow [5], Regenscheit [8], [9], Rydberg [10], Wikström [12].

Uogólnione, wyprowadzone na podstawie tych prac materiały, posiadają jednak pewne braki i nie zawsze mogą być wykorzystane w pracach projektowych, a korzystanie z nich nie we wszystkich przypadkach daje dobre rezultaty.

Jednym z charakterystycznych przykładów w przypadku sal audytoryjnych jest sprawa nawiewu powietrza do strefy przebywania ludzi. Uważa się powszechnie, że bardziej korzystny dla człowieka jest nawiew powietrza od przodu [1], [2], [4], [6],

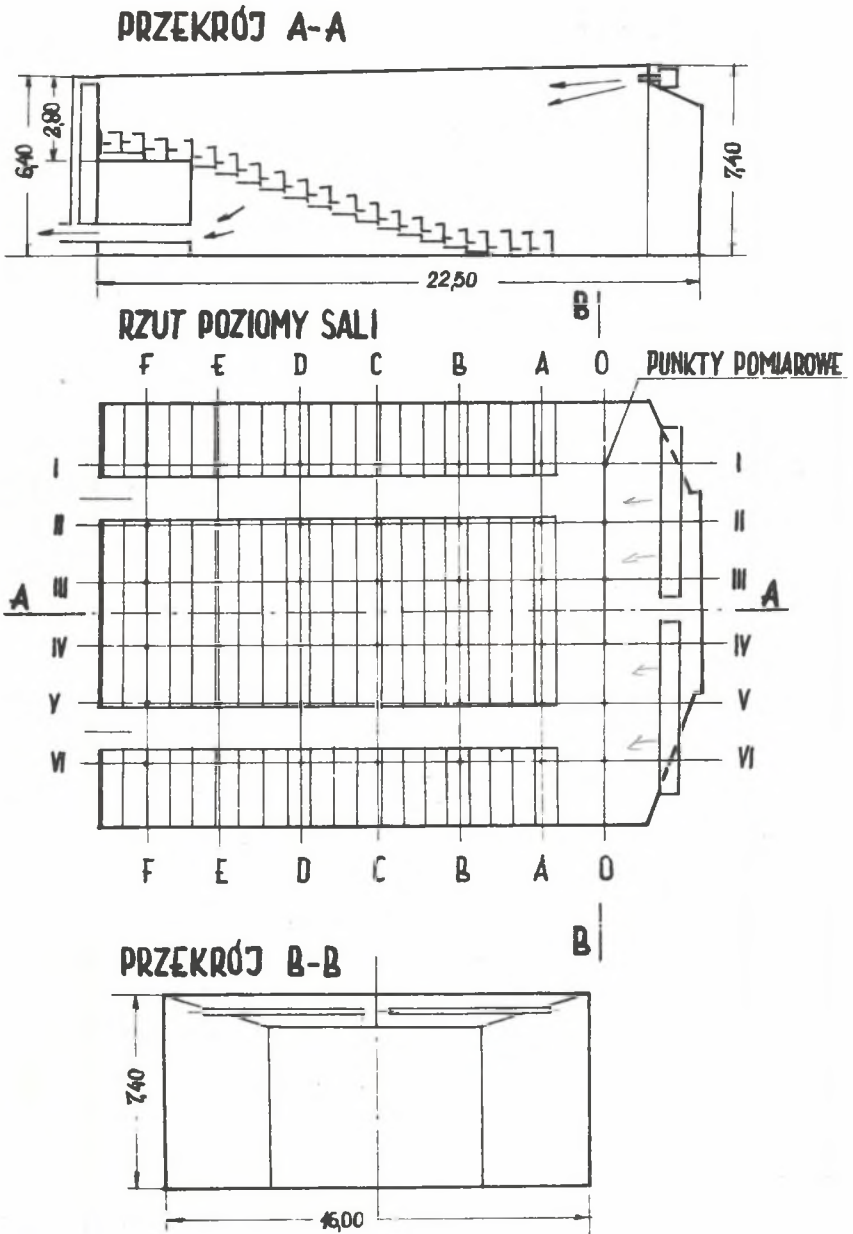
[12]. Zgodnie z tą zasadą, w salach audytoryjnych na ogół spotyka się rozmieszczenie otworów wentylacyjnych nawiewnych od przodu sali, przy zastosowaniu metody skoncentrowanego nawiewu powietrza. W tym rozwiązaniu projektanci przewidują, że strumienie nawiewane dojdą bezpośrednio do strefy przebywania ludzi.

Badania warunków wentylacji w szeregu salach audytoryjnych, przeprowadzone przez Katedrę Ogrzewnictwa i Ochrony Atmosfery [16] wykazały, że bieg strumieni nawiewnych jest zależny od wielu czynników występujących w pomieszczeniach. Między innymi duży wpływ mają tutaj kształt sali oraz prądy konwekcyjne, które tak dalece mogą zmienić rozptył powietrza, że w wielu rozwiązaniach planowane nawiewy od przodu sali zmieniają swoje tory i omywają ludzi od tyłu. Powstają więc nie zamierzone przez projektanta zupełnie odmienne układy rozptyłu powietrza w wentylowanych pomieszczeniach. To interesujące zagadnienie napływu strumieni powietrza wentylacyjnego do strefy przebywania ludzi w sali audytoryjnej, było przedmiotem badań na fizycznym modelu. Wyniki badań i obserwacji w tym zakresie omówione będą w dalszej części.

2. Badany obiekt

Badania efektywności wentylacji przeprowadzone zostały w modelu sali audytoryjnej dla 460 osób o kształcie podanym na rys. 1.

Fizyczny model tej sali - rys. 2 do 4 był wykonany w skali 1:15, przy zachowaniu geometrycznego podobieństwa. Modelowanie dokonano w oparciu o metodę przybliżonego modelowania [11], [14]. Zachowane były warunki zapewniające podobieństwo pól temperatury i prędkości powietrza, przebiegów strumieni powietrza oraz warunków wymiany ciepła w modelu i naturze. W tym celu za pewniono równość liczby Ar oraz wartość $Re > \text{ok. } 2400$ w otworach nawiewnych, a dla ciepłych strug powietrza $(Gr \times Pr) > 2 \times 10^7$.



Rys. 1. Szkic wymiarowy badanego audytorium z naniesionymi punktami pomiarowymi

W modelu zastosowano następujące skale, z których pierwsze dwie założono a następnie wyliczono:

- długość	$S_l = 1:15$
- różnicy temperatur	$S_{\Delta t} = 2:1$
- prędkości	$S_w = \sqrt{S_l \cdot S_T \cdot S_{\Delta t}} = 1:2,74$
- strumienia masy	$S_m = S_l^2 \cdot S_Q \cdot S_w = 1:616$
- strumienia ciepła	$S_Q = S_m \cdot S_{\Delta t} = 1:308$

Wartości skal przeliczeniowych:

S_T - bezwzględnej temperatury

S_Q - gęstości płynu.

Ilość doprowadzonego do modelu powietrza \dot{V}_M oraz ilość wydzielonego w modelu ciepła \dot{Q}_M określono ze stosunków:

$$\dot{V}_M = \dot{V}_N \cdot S_m \quad \text{m}^3/\text{h}$$

$$\dot{Q}_M = \dot{Q}_N \cdot S_Q \quad \text{kcal/h}$$

Ilość wprowadzonego powietrza przez otwory nawiewne w modelu:

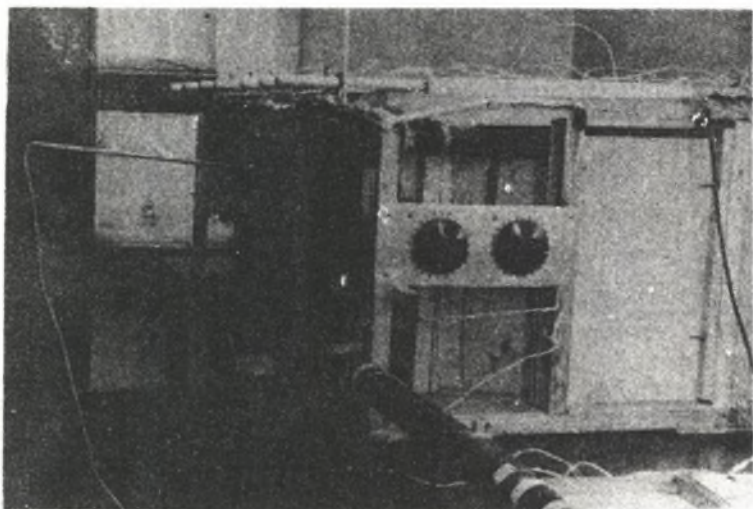
$$\dot{V}_M = 52 \quad \text{m}^3/\text{h}$$

Ilość wydzielonego ciepła od ludzi w modelu wynosiła:

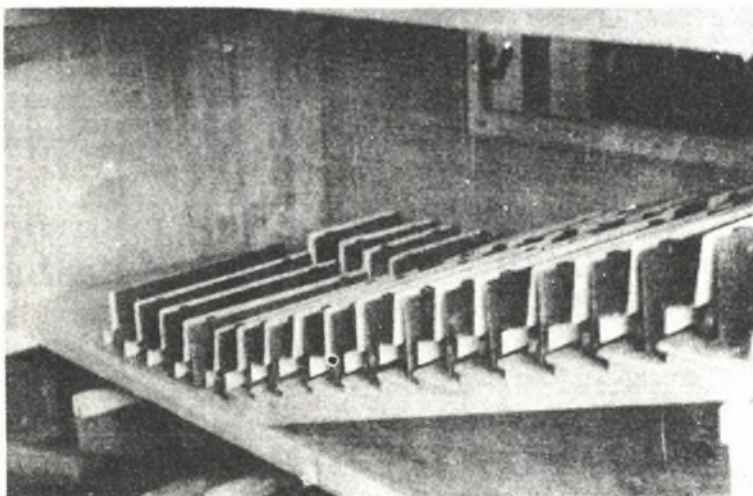
$$\dot{Q}_L = 105 \quad \text{kcal/h}$$

Ciepło oddawane było przez elementy grzejne, składające się ze spiralek chromonikielowych zabudowanych w grzejniki modelujące ludzi. Rozłożenie grzejników odpowiadało rozkładowi rzędów krzeseł w sali. Pod stropem zainstalowano elektryczne żarówki imitujące ciepło od oświetlenia w ilości $\dot{Q}_0 = 25$ kcal/h.

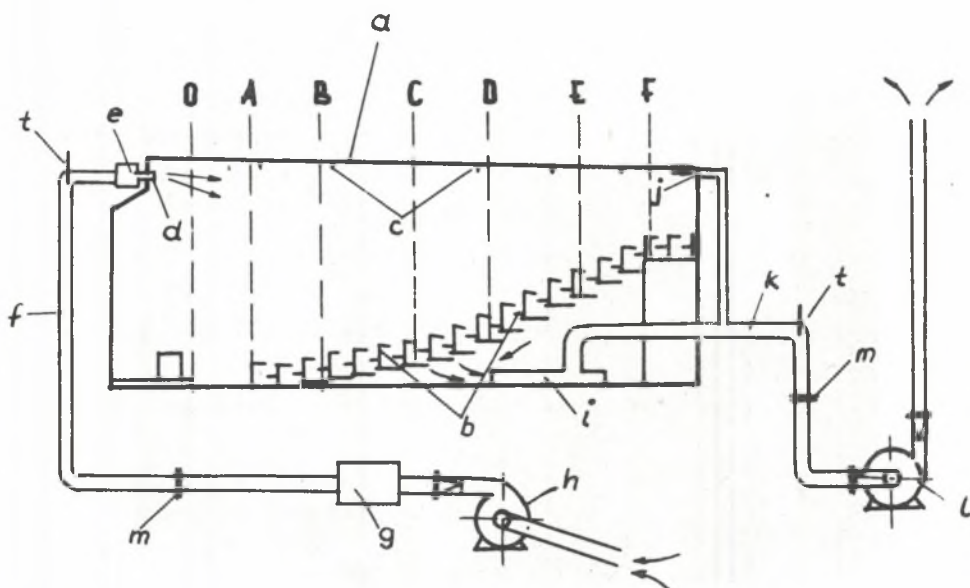
Nawiewna instalacja w modelu, którego schemat przedstawia rys. 4, zabezpiecza wprowadzenie powietrza do modelu skoncentrowanym nawiewem przez 20 otworów okrągłych usytuowanych pod stropem. Dla zapewnienia równomiernego wypływu powietrza z otworów, zastosowano odpowiednio skonstruowany przewód zbiorczy



Rys. 2. Fizyczny model audytorium



Rys. 3. Wnętrze modelu audytorium



Rys. 4. Schemat fizykalnego modelu audytorium z nawiewem od przodu: a - model sali audytoryjnej, b - grzejniki modelujące ludzi, c - grzejniki modelujące oświetlenie, d - otwory nawiewne, e - zbiorczy przewód regulacyjny dla nawiewu, f - przewody nawiewne, g - grzejnik lub chłodnica powietrza, h - wentylator nawiewny, i - otwory wywiewne regulowane u dołu, j - otwory wywiewne pod stropem, k - przewody wywiewne, l - wentylator wywiewny, m - punkty pomiarowe ilości powietrza, t - punkty pomiarowe temperatury powietrza; A do F - płaszczyzny pomiaru pól temperatur i prędkości powietrza w modelu

oraz regulację przy pomocy ruchomych tulejek. Powietrze z modelu odciągane było w ilości $\dot{V}_w = 49 \text{ m}^3/\text{h}$, z czego 85% u dołu spod stopni amfiteatru a 15% u góry.

3. Metodyka badań

Celem badania warunków wentylacji w modelu przeprowadzono następujące pomiary i obserwacje:

- obserwacje przebiegu strumieni powietrza,
- pomiary pól prędkości powietrza,
- pomiary pól temperatury powietrza.

Równolegle przeprowadzone były również pomiary ilości i temperatury powietrza w przewodach wentylacyjnych oraz otworach nawiewnych i wywiewnych - konieczne dla wyregulowania instalacji oraz sporządzenia bilansów cieplnych i masowych.

Obserwacje przebiegów strumieni powietrza umożliwiło zadywanie strumieni nawiewnych oraz dymienie w modelu. Stosowano do tego celu czterochlorek tytanu ($TiCl_4$).

Pomiary rozkładu prędkości powietrza dokonano za pomocą anemometru elektrycznego typu ZBS-4a.

Pomiary pól temperaturowych przeprowadzono zdalnie przy pomocy termopar miedź-konstantan.

Punkty pomiarowe wymienionych parametrów podano na rys. 1 oraz 4.

4. Omówienie wyników badań

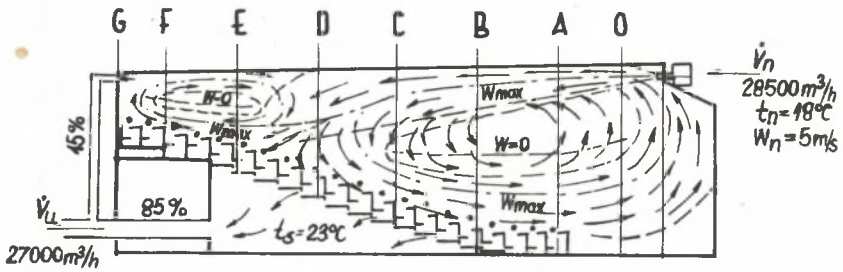
Spośród całego zakresu badań przeprowadzonych w modelu, omówione zostały poniżej wyniki dotyczące przebiegu strumieni powietrza dla dwóch różnych wariantów nawiewu powietrza do audytorium:

- nawiewu od przodu sali,
- nawiewu od tyłu sali.

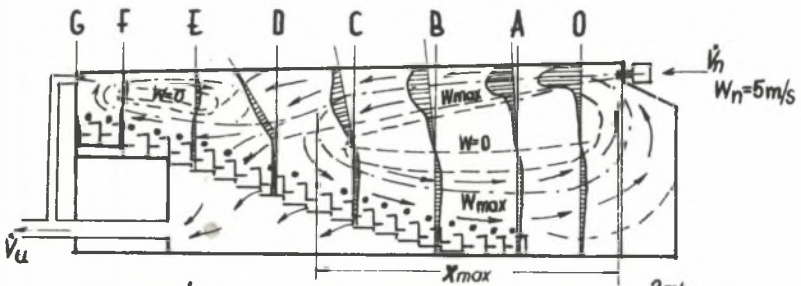
4.1. Wentylacja z nawiewem od przodu sali

Układ wentylacji odpowiada najczęściej spotykanym w salach audytoryjnych i uważa się powszechnie, że zapewnia nawiew na twarze siedzących osób. Badania przeprowadzono w sali bez ludzi oraz z pełną obsadą. Rozpływy strumieni oraz wyniki pomiarów prędkości oraz temperatur powietrza podaje rys. 5.

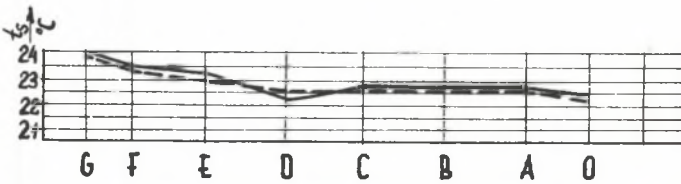
Wyraźnie uwidacznia się wpływ kształtu sali na rozprzestrzenianie się i zasięg strumieni. Nachylenie amfiteatru oraz kształt poprzeczny sali powodują wyodrębnienie się dwóch pętli cyrkulacyjnych. Położenie miejsca rozdziału tych pętli które można uważać za głębokość wnikania strumienia nawiewnego (zasięg strumienia nawiewnego x_{max}), nie ulega wyraźnej zmianie przy zwiększeniu prędkości w otworach nawiewnych powyżej 5 m/s. Kierunek krążenia powietrza w obu pętlach jest przeciwnie skierowany.



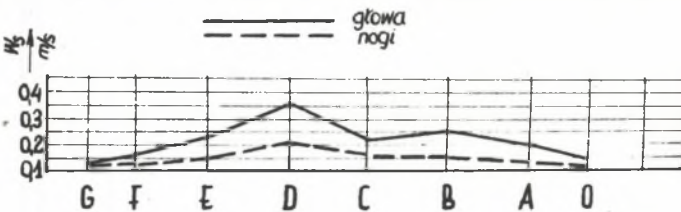
STRUMIENIE POWIETRZA W SALI



PRĘDKOŚCI W STRUMIENIACH POWIETRZA



TEMPERATURY POWIETRZA W STREFIE PRZEBYWANIA



PRĘDKOŚCI POWIETRZA W STREFIE PRZEBYWANIA

Rys. 5. Rozpływy, prędkości oraz temperatury powietrza w audytorium przy nawiewie skoncentrowanymi strumieniami z przodu sali

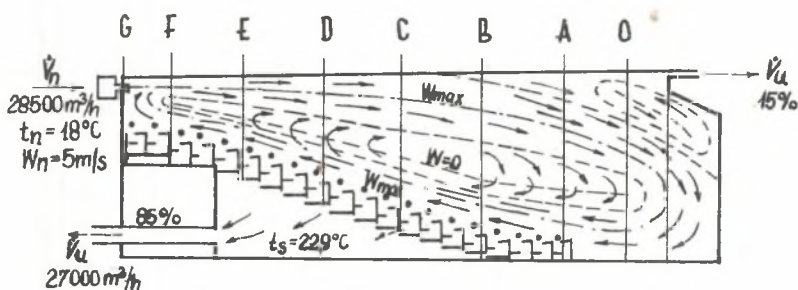
rowany. W poprzedniej części sali recyrkulacja powoduje napływ powietrza na tył głowy a nie na twarz, jak zakładano w projekcie. W tylnej części występują małe prędkości, a w ślad za tym wzrasta tam zróżnicowanie temperatury powietrza przy wypełnionej sali.

Przy takim układzie wentylacji w przeważającej części sali, warunki cieplne w strefie przebywania kształtują strumienie powietrza. Prędkość tych strumieni wynosi 0,15 do 0,37 m/s. Zwiększenie nawiewu w otworach ponad 5 m/s powoduje przyrost prędkości w strefie przebywania ale zasięg strumieni oraz obiegi powietrza w całej przestrzeni sali praktycznie nie zmieniają się. Zaobserwowano nieznaczny wpływ obsady sali na ten zasięg. Mianowicie maleje on od 0,6 L do 0,55 L w miarę przesuwania ludzi do tylnych rzędów lub w miarę zapełniania sali. Na długości zasięgu strumienia nawiewnego w strefie przebywania ludzi (x_{max}) przy pełnej obsadzie występuje wyrównany profil temperatury powietrza. Poza zasięgiem strumienia gdzie znacznie maleje prędkość, temperatura szybko wzrasta o 1,5 deg na długości zaledwie 3,5 m. Wobec utrzymania wymaganych odległości między osiami otworów nawiewnych, zapewniony został równomierny przepływ powietrza na całej szerokości sali. Podobne przepływy uzyskuje się również przy otworach szczelinowych o długości równej szerokości pomieszczenia.

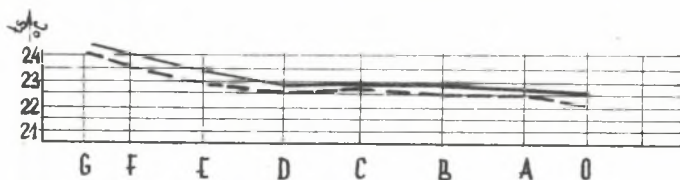
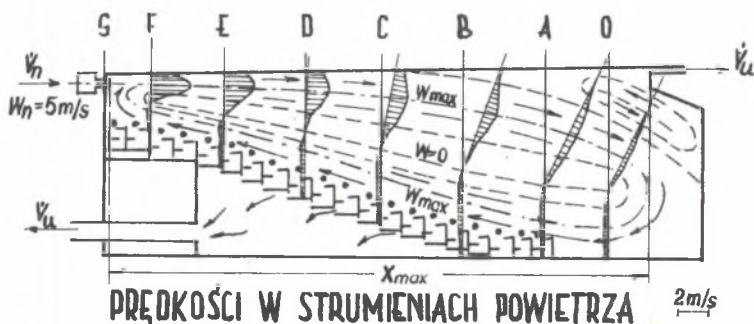
4.2. Wentylacja z nawiewem od tyłu sali

Badania były przeprowadzone w sali bez ludzi oraz przy pełnej obsadzie.

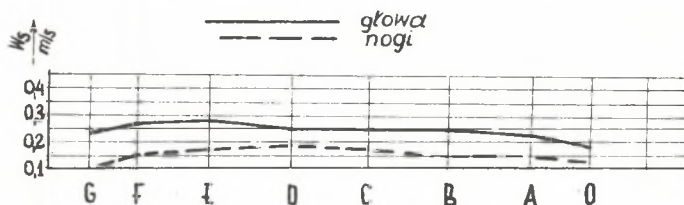
W obu przypadkach uzyskuje się korzystny rozdział powietrza w całym audytorium. Strefa przebywania jest na całej przestrzeni omywana strumieniami powrotnymi skierowanymi na ludzi od przodu. Prędkości w tych strumieniach mieszczą się w granicach od 0,17 do 0,27 m/s. Temperatura tych strumieni przy pełnej obsadzie jest dość dobrze wyrównana z tym, że w górnej części widowni wartość jej była wyższa o ok. 1 deg od przeciętnej. Rozprzestrzenianie się strumieni oraz wyniki pomiarów przedstawia rys. 6. Przedstawiony na nich zasięg strumieni nawiewnych przy



STRUMIENIE POWIETRZA W SALI



TEMPERATURY POWIETRZA W STREFIE PRZEBYWANIA



PRĘDKOŚCI POWIETRZA W STREFIE PRZEBYWANIA

Rys. 6. Rozpływy, prędkości oraz temperatury powietrza w audytorium przy nawiewie skoncentrowanymi strumieniami z tyłu sali

prędkości w otworach nawiewnych 5 m/s, wypełnia pomieszczenie całkowicie. Przy takiej prędkości, nie występują już wyraźniejsze różnice w przebiegu strumieni w sali pustej i z pełną obsadą. Energia nawiewu jest wtedy akuratnie wystarczającą aby otrzymać krążenie wypełniające w sali oraz strumienie powietrza, przepływające przez całą przestrzeń przy właściwych parametrach w strefie przebywania ludzi. Przy zwiększeniu energii nawiewu obraz strug pozostaje ten sam przy równoczesnym wzroście parametrów prędkości w pomieszczeniu.

Wykres prędkości strumieni powrotnych wykazuje pewien wzrost jej wartości w kierunku wyższych rzędów. Wiąże się to zapewne ze sumowaniem działania strumieni powrotnych i konwekcyjnych, jakie występuje przy odpowiednim doborze parametrów strumieni nawiewnych.

4.3. Podsumowanie wyników badań

W przedstawionych rozwiązaniach wentylacji strumienie nawiewne nie dochodzą bezpośrednio do strefy przebywania, która przemywana jest powolnymi strumieniami powrotnymi. Przy nawiewie z prędkością 5 m/s uzyskano w strumieniach nawiewnych odpowiedni zasób energii, wystarczający dla przewyższenia energii zaburzającej strumieni konwekcyjnych.

Spśród rozważanych przypadków najbardziej korzystne rezultaty osiąga się w audytorium przy nawiewie z tyłu z dostateczną prędkością. Uzyskane tam warunki wentylacji charakteryzują się dogodnymi wartościami parametrów cieplnych i kierunkiem przepływu powietrza w strefie przebywania, a także stabilnością rozptyłu strumieni powietrza, mało zależną od obsady sali.

5. Wnioski

1. Warunki komfortu cieplnego, korzystny zakres wartości parametrów cieplnych dla strefy przebywania ludzi w wentylowanych pomieszczeniach są wystarczająco sprecyzowane przez fizjologów. Natomiast istniejące normatywy projektowania wentylacji a także literatura techniczna, nie dają projektantowi podstaw dla zorganizowania takich warunków w praktyce.

2. Przeprowadzone w salach audytoryjnych badania warunków wentylacji [16] wykazują, że przy projektowaniu wentylacji w oparciu o istniejące zasady i normatywy można uzyskać różne i nie zamierzone warunki cieplne z następujących powodów:
- wymiana powietrza, przyjęta na podstawie ilości osób, nie jest warunkiem wystarczającym dla zapewnienia w strefie przebywania ludzi wymaganych wartości parametrów cieplnych,
 - projektant nie analizuje we właściwy sposób przebiegu strumieni powietrza w pomieszczeniu wentylowanym,
 - strumienie nawiewne przyjęte z małą prędkością nie są w stanie przeciwdziałać zaburzającym prądom konwekcyjnym od ludzi.
3. W opracowaniach wentylacji powinny być uwzględniane równolegle z przyjętą wymianą również warunki rozdziału oraz rozprzestrzeniania się powietrza w pomieszczeniu. O właściwym rozwiązaniu tego zagadnienia decydują; strumienie nawiewne, kształt i wielkość pomieszczenia oraz występujące zakłócenia.
- Wszystkie te niezbędne dane do projektowania wentylacji można uzyskać na drodze modelowych badań warunków wentylacji.
4. W oparciu o modelowe badania powinny być ustalane wytyczne dla projektowanych wentylacji. Wytyczne te powinny przede wszystkim podawać sposób organizowania rozdziału powietrza w określonych pomieszczeniach. W tym celu powinny one zawierać następujące dane:
- charakterystykę zakłóceń wnoszonych przez strumienie konwekcyjne od ludzi,
 - potrzebną energię kinetyczną w strumieniach nawiewnych,
 - korzystny sposób rozmieszczenia otworów nawiewnych.
5. Pomiarы przeprowadzone w naturalnym obiekcie audytorium po usprawnieniu wentylacji na podstawie wyników badań modelowych w pełni potwierdziły słuszność tych badań oraz wykazały konieczność ich stosowania.

LITERATURA

- [1] BATURIN W.W.: Osnovy Promiszlenuj Wentilaczi, Moskwa 1965 r.
- [2] BECHER P.: Luftverteilung in gelüfteten Räumen. Heiz.-Luft.-Haustechnik 17 1966. Nr 7.
- [3] LINKE W.: Strömungsvorgänge in zwangsbelüfteten Räumen. VDI - Ber. 21 1957.
- [4] LINKE W.: Lüftung von oben nach unten oder umgekehrt. Gesundheit - Ing 1962 Nr 5.
- [5] MAKSIMOW G.A.: Otoplenie i Wentilacia II oz. Moskwa 1968 r.
- [6] FERENCOWICZ J.: Wentylacja i Klimatyzacja Arkady 1964.
- [7] KOREŃKOW W.E.: Nowyj metod razozeta i ocenki mikroklimata żiliszcz. Izwestija Akad. Stroit. i Arch. SSSR 1954 nr 4 s. 131.
- [8] Regenscheit B.: Modellversuche zur Erforschung der Raumströmung in belüfteten Räumen. Staub. 1964 Nr 1.
- [9] REGENSCHKEIT B.: Luftbewegung in Klimatisierten Räumen. Kältetechnik 1959 Nr 1.
- [10] RYDBERG J., NORBACK P.: Air Distribution and Draft Trans. ASHVE - 1949.
- [11] TALIEW W.N.: Aerodynamika wentilaczi. Gos. Izd. Liter. po Stroit., Archit. i Stroit. Mater. Moskwa 1963.
- [12] WIKSTRÖM B.: Gesichtspunkte zur Gestaltung des Lufteinblaus in belüftete Rären. Heiz.-Luft.-Haustechnik 17, 1966, Nr 2.
- [13] Praca zbiorowa SANTIACHPROJEKTu Moskwa: Sprawoznik projektrowszczika promyszlennych, żilych i obszczwestwiennych zdaniij i sooruzenij. Cz. II. Wentilacja i kondicjo-nirowanie wozduoha. Izdat. Liter. po Stroit. Moskwa 1969.
- [14] BATURIN W.W. i ELTERMAN W.M.: Aeracja promyszlennych zdaniij. Gos. Izd. Lit. po Stroit. Arch. i Stroit. Mater. Moskwa 1963.
- [15] BUTAKOW S.E.: Aerodynamika system promyszlennych wentylaczi. Moskwa 1949.
- [16] MAJERSKI S., MIERZWIŃSKI S., DZIEGCIARZ J., DĄBEK A.: Studium wentylaczi sal audytoryjnych. Część 1. Teoretyczne podstawy i badania w naturalnych obiektach.

S t r e s z c z e n i e

Omówiono przykład zastosowania fizykalnego modelowania dla wyjaśnienia rozdziału powietrza wentylacyjnego w sali audytorijnej. Wnioski z przeprowadzonych badań modelowych pozwoliły na znaczne usprawnienie wentylacji rozważanego audytorium.

МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА В АУДИТОРИЯХ

Р е з ю м е

Обсуждено пример применения физикального моделирования для выяснения распределения вентиляционного воздуха в лекционном зале.

Заключения с приведенных модельных исследований разрешили значительно улучшить вентиляцию рассматриваемой аудитории.

THE INVESTIGATIONS ON THE MODELLING OF AIR DISTRIBUTION IN AUDITORIUM ROOMS

S u m m a r y

An example of the application of physical modeling for the determination of the ventilation air distribution in an auditorium room was discussed. The results of the modeling investigations made it possible to improve considerably the ventilation of the auditorium room considered.