



POLITECHNIKA WARSZAWSKA

ISSN 0137-2297

PRACE NAUKOWE • BUDOWNICTWO • z. 78

Bogdan Mizieliński

**WPŁYW STRUMIENI ZAKŁÓCAJĄCYCH
NA KSZTAŁTOWANIE SIĘ STRUMIENI
POWIETRZA WENTYLACYJNEGO**



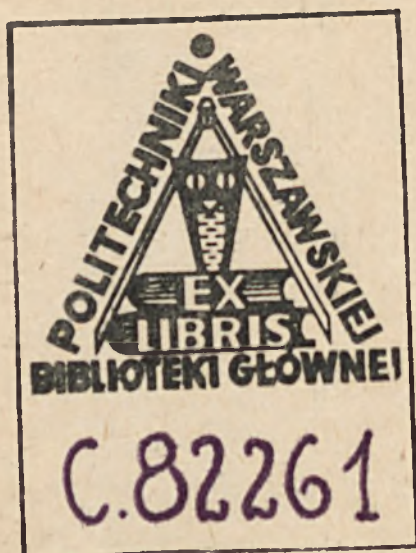
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ • WARSZAWA 1983

Spis rzeczy — Содержание — Contents

Bogdan Mizieliński — Wpływ strumieni zakłócających na kształtowanie się strumieni powietrza wentylacyjnego 3

Влияние нарушающего движения воздуха на формирование течения вентиляционных струй

The influence of flow disturbing air movements on the formation of ventilation air streams



[533.6.071.5 : 697.921.4] : 043

POLITECHNIKA WARSZAWSKA

PRACE NAUKOWE
BUDOWNICTWO z. 78

[HABILITACJA]



WARSZAWA 1983

WYDAWNICTWA POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

REDAKTOR DZIAŁOWY

prof. mgr inż. Władysław Danilecki

OPINIODAWCA

prof. dr hab. Witold Wasilewski

Opracowanie redakcyjne – Halina Wilochowa



WYDAWNICTWA POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ, 00-665 WARSZAWA, NOWOWIEJSKA 24
ИЗДАТЕЛЬСТВА ВАРШАВСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
00-665 ВАРШАВА, ул. НОВОВЕЙСКА 24
WARSAW TECHNICAL UNIVERSITY PUBLICATIONS, 00-665 WARSAW, NOWOWIEJSKA 24

Nakł. 200+30. Ark. wyd. 4,76. Ark. druk. 5,75. Papier offset. kl. III 70 g. Oddano do druku
6. XI. 1982 r. Druk ukończono w styczniu 1983 r. Zamówienie nr 888/82. Cena zł 48,-

Wykonano w Zakładzie Graficznym Politechniki Warszawskiej, W-wa, ul. Kopińska 12/16.

144-7-84-D.

Bogdan Mizieliński

Instytut Ogrzewnictwa i Wentylacji

WPŁYW STRUMIENI ZAKŁÓCAJĄCYCH NA KSZTAŁTOWANIE SIĘ STRUMIENI POWIETRZA WENTYLACYJNEGO

Rękopis dostarczono 7. 10. 1982

W pracy przeprowadzono analizę czynników wpływających na zakłócenia przebiegu strumieni powietrza wentylacyjnego.

W oparciu o rozważania teoretyczne oraz przeprowadzone badania wykazano zależności między występującymi w warunkach eksploatacyjnych zakłóceniami a formowaniem się nawiewanych strumieni powietrza.

Zamieszczono zależności umożliwiające określenie wpływu zakłóceń na kształtowanie warunków przepływu powietrza w strefie pracy.

1. WSTĘP

W wielu obiektach przemysłowych technologia produkcji wymaga utrzymania niezmiennych parametrów powietrza. Związane jest to z produkcją wyrobów o odpowiedniej jakości, w tym także z wytwarzaniem przedmiotów o szczególnych wymaganiach tolerancji wymiarowych. Ocenę stabilności narzuconych parametrów można jedynie dokonać na drodze pomiarów już działającej instalacji. Badania takie są często trudne do przeprowadzenia ze względu na brak wyspecjalizowanych grup pomiarowych, odpowiedniego sprzętu, a także utrudnień związanych z występującym wyposażeniem technologicznym w strefie pracy.

W związku z tym zwiększony jest nacisk na prawidłowe określenie przepływów powietrza w strefie pracy, w procesie projek-

towania. Dotychczasowa praktyka projektowa w tym zakresie ma jeszcze znaczne niedociągnięcia. Niektóre z nich przytoczono poniżej.

Zakładając prędkości powietrza na granicy wejścia do strefy pracy, obliczenia przeprowadza się dla określonego strumienia powietrza przy danej konstrukcji nawiewnika. Obliczane w ten sposób ciśnienie w nawiewniku często już w fazie projektu nie jest dotrzymane ponieważ występują przypadki nieszerowazenia hydraulicznego instalacji jako wynik nieuwzględniania rozkładu ciśnień w budynku i przewodach wentylacyjnych łączących pomieszczenia. Mogą także następować przesunięcia punktu pracy w charakterystyce wentylatora w związku z występowaniem zmiennych warunków eksploatacyjnych.

Inne ważne przyczyny mogące powodować zmianę kształtu strumienia to: strumienie poprzeczne wynikające z infiltracji a także ruchu urządzeń (ruchome elementy maszyn i pojazdów), występowanie strumieni pionowych konwekcyjnych swobodnych powstających na skutek wydzielania się ciepła w maszynach i urządzeniach oraz w procesach technologicznych.

Opublikowane dotychczas prace związane z omawianym zagadnieniem między innymi [1], [2], [3], [4] świadczą o zwiększonym zainteresowaniu problemami przepływu powietrza w strefie pracy.

Jednakże dotychczasowe opracowania z reguły pomijały warunki rzeczywiste mające wpływ na kształtowanie się strumienia powietrza w niestabilnym ośrodku.

Zapewnienie właściwych warunków cieplnych przy optymalnych prędkościach powietrza, decyduje o wydajności i jakości wykonywanych czynności a także o ogólnym samopoczuciu człowieka [5], [6]. Prędkość powietrza w strefie pracy jest jednym z podstawowych parametrów określających warunki komfortu cieplnego [7] a także często jednym z ważnych wymagań technologii. Przepływy powietrza w strefie pracy zakłócanie strumieniami deformującymi mogą odbiegać w znacznym stopniu od przyjętych założeń rozdziału powietrza.

Istotnym problemem jest określenie, jak deformacje strumieni nawiewanych zmieniają warunki przepływu powietrza w strefie pracy.

W niniejszym opracowaniu szczególną uwagę zwrócono na zachowanie się poziomo nawiewanych strumieni powietrza w warunkach izotermicznych i nieizotermicznych przy występujących jednocześnie strumieniach zakłócających. W wyniku badań oraz przeprowadzonej analizy sformułowano sugestie co do określenia warunków nawiewu powietrza do strefy pracy przy występowaniu strumieni zakłócających. Przeprowadzone w tej pracy rozważania nie wyczerpują zagadnienia z uwagi na jego rozmiar, a są jedynie przyczynkiem do dalszych badań i analiz. Pracę niniejszą ukierunkowano pod kątem nowego spojrzenia na kształtowanie się strumieni powietrza nawiewanego w niestabilnych warunkach eksploatacyjnych.

2. CEL PRACY

Celem pracy jest:

- przedstawienie metody obliczania miejscowych wzrostów prędkości w zaprojektowanym układzie rozdziału powietrza w pomieszczeniu, wynikających z zakłóceń w przepływie strumieni wentylacyjnych,
- określenie sposobu oceny prędkości przepływu powietrza w strefie pracy,
- przeprowadzenie analizy skutków zakłócającego wpływu boczного strumienia płaskiego na rozwijanie się wentylacyjnego strumienia osiowo-symetrycznego.

Wstępna część opracowania zawiera przegląd sposobów oraz stosowanych kryteriów związanych z obliczaniem prędkości powietrza wentylacyjnego nawiewanego do strefy pracy. Przeanalizowano zagadnienia związane z określeniem najbardziej efektywnego sposobu oceny prędkości w strumieniach poziomych w rejonie wejścia do strefy pracy w nawiązaniu do oceny możliwości kształtowania przepływu powietrza w pomieszczeniu.

Następnie określono zasady obliczania strumieni wentylacyjnych zdeformowanych strumieniami zakłócającymi. Dla weryfikacji obliczeń wykonano pomiary na specjalnie do tego celu przygotowanym stanowisku pomiarowym. Wyniki obliczeń i doświadczeń przeanalizowano i na tej podstawie opracowano zależ-

ności pozwalające na obliczenie rozkładu prędkości w odkształconych strumieniach.

Określono także zależności pozwalające na obliczenie średnich prędkości przepływu w strefie pracy co jest szczególnie istotne w związku z wysokimi wymaganiami stabilności przepływu powietrza dla niektórych technologii produkcji.

3. KSZTAŁTOWANIE PODSTAWOWYCH PARAMETRÓW MIKROKLIMATU W STREFIE PRACY

Ukształtowanie środowiska w miejscu pracy zyskuje coraz większe znaczenie, w tym głównie z uwagi na ochronę zdrowia, uzyskiwanie wysokiej wydajności pracy oraz wprowadzenie technologii o wysokich wymaganiach stabilnego mikroklimatu.

Istotnym zagadnieniem jest ustalenie optymalnych parametrów tworzących mikroklimat w strefie pracy oraz zdefiniowanie wielkości umożliwiających porównanie tych parametrów w różnych miejscach strefy pracy.

Nawet jeżeli ogólne wymagania komfortu cieplnego dla osób zatrudnionych są zadowalające to jednocześnie mogą występować lokalne zmiany temperatury i prędkości powietrza. Kolejne opracowania kilku badaczy dowiodły zależności pomiędzy miejscową prędkością i temperaturą (różnicą między temperaturą przemieszczającego się powietrza a średnią temperaturą w pomieszczeniu) a reakcją na odczucie komfortu przez ludzi. Zdefiniowano efektywną temperaturę powietrza przemieszczającego się w strefie pracy [8]

$$\theta = (t_x - t_c) - 7,66 (w_x - 0,15), \quad (1)$$

gdzie

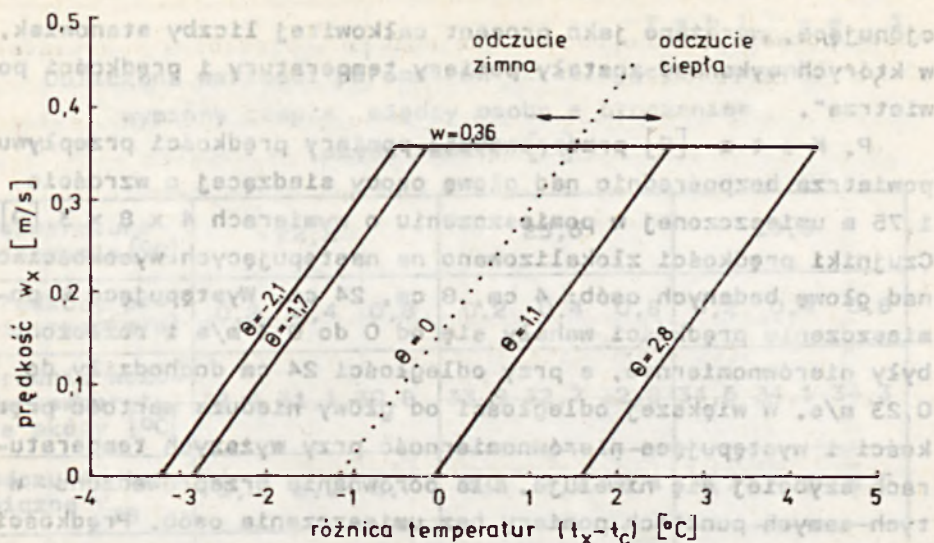
θ - efektywna temperatura powietrza w strefie pracy [$^{\circ}\text{C}$],

t_x - miejscowa temperatura powietrza [$^{\circ}\text{C}$],

t_c - średnia temperatura w pomieszczeniu [$^{\circ}\text{C}$],

w_x - miejscowa prędkość powietrza [m/s].

Relacje między tymi wielkościami pokazano na rys.1.



Rys.1. Kryteria komfortu [8]

Dane podawane przez H o u g h t o n a [8] wskazywały, że 80% osób odczuwało komfort na prawo od linii $\theta = -1,7$. Kiedy miejscowa temperatura jest wyższa niż średnia temperatura, niska prędkość daje uczucie ciepła, wysoka prędkość, uczucie zimna. Prędkość $> 0,15$ m/s zmniejsza efektywną temperaturę powietrza w strefie pracy i przez to zwiększa komfort cieplny (równanie (1)).

Dane Houghtena pomimo, że nie zawierały studiów nad dyskomfortem cieplnym pokazały, że zmiany prędkości o 0,137 m/s dają w przybliżeniu ten sam efekt odnośnie komfortu co zmiana temperatury o 1°C . Przyjmując $w_x = 0$ i $t_x - t_c = 0$ i wstawiając do równania (1) otrzymujemy $\theta = 1,1^{\circ}\text{C}$. Wartość ta potwierdzona była przez K o e s t e l a i T u v e [8]. Biorąc pod uwagę górny limit prędkości 0,36 m/s i dolny limit 0 m/s obszar komfortu zdefiniowano przez $1,7 \leq \theta \leq 1,1$ i $0 < w_x \leq 0,36$ m/s. Kiedy efektywna temperatura przepływającego powietrza w strefie pracy jest w tym obszarze, 80% lub więcej zatrudnionych osób odczuwa właściwy komfort. Uwzględniając powyższe kryteria zdefiniowano ADPJ (Air Diffusion Performance Index) jako: "liczbę stanowisk pomiarowych równomiernie rozmieszczonych w strefie pracy, w których kryteria komfortu są satysfak-

cjonujące, wyrażane jako procent całkowitej liczby stanowisk, w których wykonane zostały pomiary temperatury i prędkości powietrza”.

P. K a t z [9] przeprowadził pomiary prędkości przepływu powietrza bezpośrednio nad głową osoby siedzącej o wzroście 1,75 m umieszczonej w pomieszczeniu o wymiarach 4 x 8 x 3 [9]. Czujniki prędkości zlokalizowano na następujących wysokościach nad głową badanych osób: 4 cm, 8 cm, 24 cm. Występujące w pomieszczeniu prędkości wahały się od 0 do 0,3 m/s i rozłożone były nierównomiernie, a przy odległości 24 cm dochodziły do 0,23 m/s. W większej odległości od głowy nieduża wartość prędkości i występująca nierównomierność przy wyższych temperaturach szybciej się niweluje. Dla porównania przeprowadzono w tych samych punktach pomiary bez umieszczenia osób. Prędkości dla większości punktów układają się równomiernie. Często jednak w pomieszczeniach z równomiernymi temperaturami i bardzo niskimi prędkościami występują krótkotrwałe niespodziewane ruchy powietrza.

Odczucie termiczne człowieka uzależnione jest w znacznym stopniu od wrażliwości poszczególnych jego części ciała.

Średnia ważona temperatura skóry t_{sk} określona z równania opracowanego przez R. G o l d m a n a [10]

$$t_{sk} = 0,5 t_{sk_1} + 0,36 t_{sk_n} + 0,14 t_{sk_r}, \quad (2)$$

gdzie

t_{sk} - średnia ważona temperatura skóry [$^{\circ}\text{C}$],

t_{sk_1} - temperatura skóry klatki piersiowej [$^{\circ}\text{C}$],

t_{sk_n} - temperatura skóry nóg [$^{\circ}\text{C}$],

t_{sk_r} - temperatura skóry rąk [$^{\circ}\text{C}$].

Odczucie termiczne (Thermal Sensation) Y_{TS}

$$Y_{TS} = 0,675 t_{SK} - 18,59. \quad (3)$$

Odczucie ruchu powietrza (Air motion Affectivity)

$$Y_{Am} = 17,7997 t_{SK} - 0,2718 t_{SK}^2 - 286,29. \quad (4)$$

T a b l i c a 1

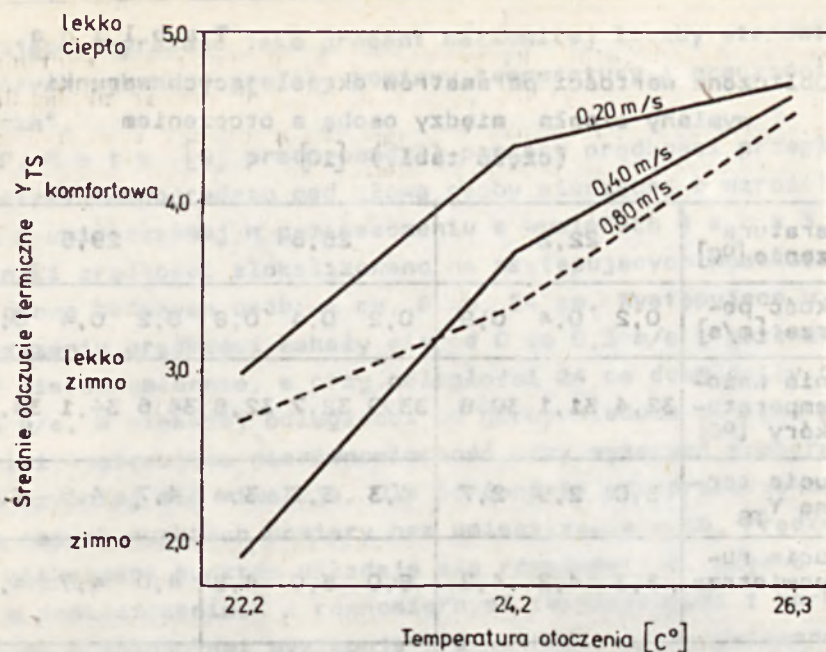
Obliczone wartości parametrów określających warunki
wymiany ciepła między osobą a otoczeniem
(część tabl.) [10]

Temperatura otoczenia [°C]	22,2			25,6			29,5		
Prędkość powietrza [m/s]	0,2	0,4	0,8	0,2	0,4	0,8	0,2	0,4	0,8
Średnia ważona temperatura skóry [°C]	32,4	31,1	30,8	33,9	32,7	32,8	34,6	34,1	34,3
Odczucie termiczne Y_{TS}	3,0	2,9	2,7	4,3	3,7	3,4	4,7	4,6	4,5
Odczucie ruchu powietrza Y_{Am}	5,3	4,2	4,2	5,0	5,0	4,8	4,0	4,7	4,4
Temperatura powierzchni ubrania [°C]	27,1	26,0	25,4	29,7	28,8	28,5	32,0	21,4	31,3
Występujące straty ciepła [W/m ²]	77,0	63,0	66,6	52,3	48,3	53,8	32,7	31,2	36,5

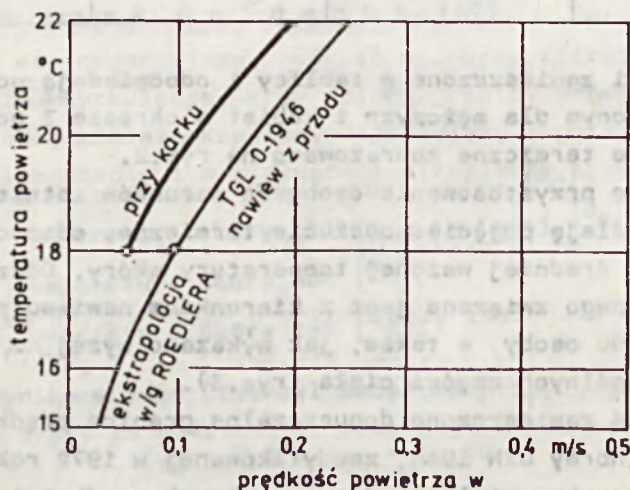
Wartości zamieszczone w tablicy 1 odpowiadają pomiarom przeprowadzonym dla mężczyzn i kobiet w okresie 3 godzin. Średnie odczucie termiczne zobrazowano na rys.2.

Okresowe przystosowanie osoby do warunków istniejących, wyraźnie określają pojęcia: odczucie termiczne, odczucie ruchu powietrza i średniej ważonej temperatury skóry. Odczucie komfortu cieplnego związane jest z kierunkiem nawiewu powietrza w stosunku do osoby, a także, jak wykazano wyżej, z wrażliwością poszczególnych części ciała (rys.3).

Na rys.4 zamieszczono dopuszczalne granice prędkości powietrza wg normy DIN 1946, zmodyfikowanej w 1972 roku. Jak wynika z rysunku, wielkość dopuszczalnych prędkości podnosi się przy wzroście temperatury powietrza w pomieszczeniu [12], [13], [14]. Krzywa 1 określa wielkości parametrów, które nie mogą być przekroczone. Dobór parametrów powinien następować

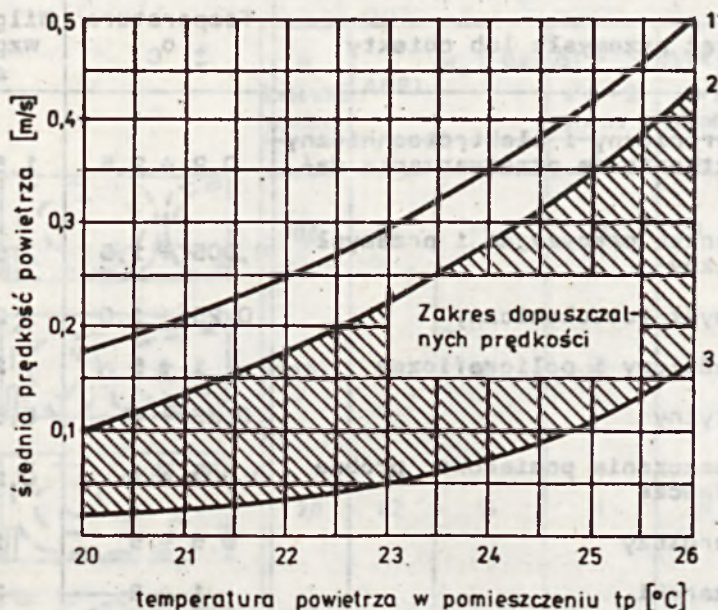


Rys. 2. Średnie odczucie termiczne dla osób siedzących, w ciągu 3 godzin, przy 3 temperaturach suchego termometru oraz przy 3 prędkościach powietrza



Rys. 3. Dopuszczalne prędkości powietrza nawiewanego w kierunku osoby znajdującej się w pomieszczeniu w zależności od temperatury powietrza [11]

w obciążeniu ograniczonym krzywymi 2 i 3. Najmniejsze wartości zmian parametrów powietrza, które muszą być bezwarunkowo dotrzymane dla zabezpieczenia dobrego samopoczucia wyznacza krzywa 3. Przy określaniu powyżej omówionych krzywych uwzględnio-



- 1 - górna krzywa graniczna
- 2 - średnia krzywa graniczna
- 3 - dolna krzywa graniczna

Rys.4. Dopuszczalny zakres średnich prędkości powietrza w zależności od temperatury w pomieszczeniach wentylowanych mechanicznie [12]

no bilans cieplny osób, rodzaj ubrania, temperaturę zewnętrzną oraz temperatury zewnętrznych powierzchni otaczających przedmiotów i przegród.

Oprócz określania warunków komfortu cieplnego dla osoby przebywającej w strefie pracy istotne są realizowane tam procesy technologiczne. Ważne jest więc określenie stabilności parametrów dla poszczególnych rodzajów produkcji. Dopuszczalne wahania temperatury oraz wilgotności względnej dla różnych gałęzi podano w tablicy 2, przy prędkościach powietrza zapewniających odczucie komfortu przez zatrudnionych tam ludzi.

T a b l i c a 2

Tolerancje temperatury i wilgotności względnej
dla różnych gałęzi przemysłu lub obiektów [15]

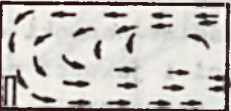
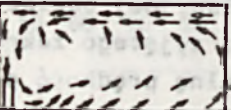
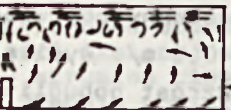
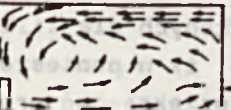
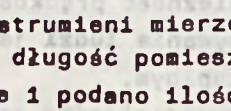
Gałąź przemysłu lub obiekty	Temperatura $\pm$ °C	Wilgotność względna $\pm$ %
Elektroniczny i elektrotechniczny (elektroniczne przetwarzanie danych)	0,2 $\div$ 2,5	1,5 $\div$ 5
Mechanika precyzyjna i przemysł optyczny	0,005 $\div$ 1,5	5
Przemysł fotochemiczny	0,25 $\div$ 1,0	2 $\div$ 5
Papierniczy i poligraficzny	1 $\div$ 5	2 $\div$ 5
Tekstylny	0,35 $\div$ 4	0,5 $\div$ 5
Pomieszczenia pomiarowe, próbne i badawcze	0,002 $\div$ 2	0,2 $\div$ 10
Cukierniczy	0,5 $\div$ 5	1 $\div$ 2
Mleczarski	1 $\div$ 2	2 $\div$ 5
Tytoniowy	2	1,5 $\div$ 5
Różne inne gałęzie przemysłowe	0,25 $\div$ 2	5
Przetwórstwo rolne	1 $\div$ 3	5
Sale konferencyjne, szkoły, szpitale	0,5 $\div$ 2	5
Pojazdy	1 $\div$ 2	-

Określający warunki mikroklimatu przepływ powietrza wentylacyjnego przez strefę pracy związany jest także z kształtem geometrycznym pomieszczenia.

Badania nad wpływem wymiarów geometrycznych pomieszczenia na ukształtowanie strumienia a zatem i jego efektywności, prowadzili P.L. M i l l e r i R.T. N a s h [16]. Rozpatrywano pomieszczenie, w którym nawiewano poziome strumienie powietrza z nawiewników usytuowanych pod sufitem. Efektywność dzia-

T a b l i c a 3

Przepływy powietrza przez pomieszczenie przy
nawiewnikach ściennych usytuowanych pod sufitem
(przy obciążeniu zyskami ciepła 227 kJ/m^2) [16]

	n Krotność wymian	ADPJ	$w_x > 0,35$	$\Delta T > -5$ ● < -3 zimno	$\Delta T < 5$ ● > 2 ciepło
	1	2	3	4	5
	0,6	68	5	9	51
	1,0	79	6	15	22
	2,0	82	11	1	26
	3,0	74	56	1	0
	4,0	31	147	2	0
	5,0	20	171	1	0

łania strumieni mierzono w 216 punktach przy czym charakterystyczna długość pomieszczenia wynosiła 6,1 m. W tablicy 3 w rubryce 1 podano ilość wymian powietrza co charakteryzowało zmianę intensywności nawiewu powietrza. Wartości ADPJ określały efektywność warunków rozdziału powietrza w aspekcie wymaganych warunków mikroklimatu powietrza. Rubryki 3,4,5 podawały

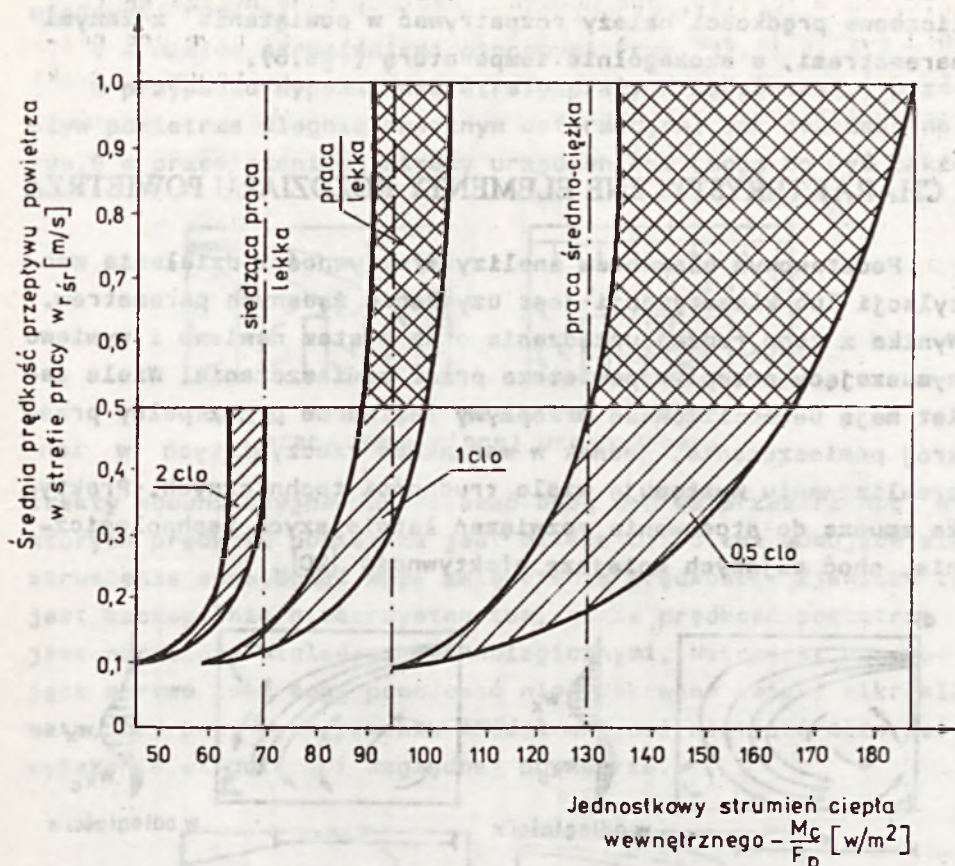
ilość punktów w których przekroczone zostały warunki wyszczególnione w tablicy. Jak wynika z tablicy 3 najwyższa wartość ADPJ wystąpiła przy 2 wymianach powietrza przy czym podkreślić należy, że w tym czasie w pomieszczeniu występowały zyski ciepła 227 W/m^2 . Z zamieszczonych danych wynika, że zwiększanie prędkości powietrza a zatem zwiększenie ilości punktów, w których prędkość jest wyższa od $0,35 \text{ m/s}$ powoduje wyraźne pogorszenie warunków komfortu cieplnego, czego wskaźnikiem jest obniżenie wartości ADPJ.

4. PRĘDKOŚĆ POWIETRZA W STREFIE PRACY

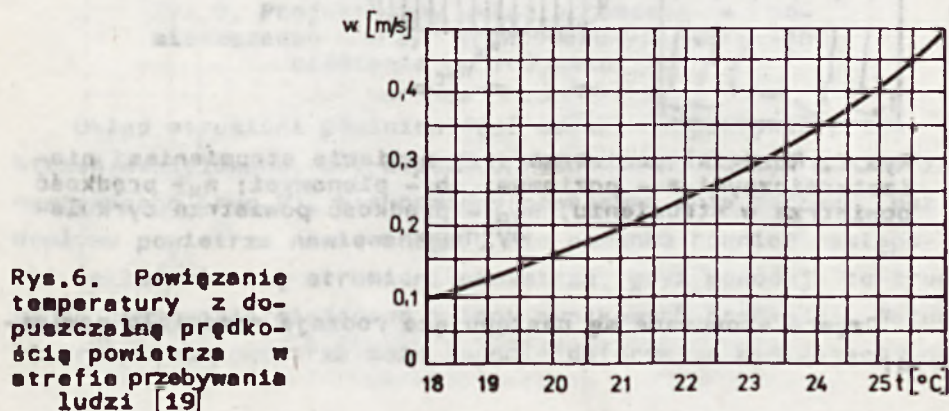
Prędkość przepływu powietrza ma znaczny wpływ na wielkość zdolności chłodzącej otoczenia. Organizm ludzki posiada zdolność asymilacji, ale tylko w pewnych granicach, których przekroczenie związane może być z wystąpieniem reakcji ubocznych. W wielu badaniach stwierdzono, że niewłaściwe warunki otoczenia powodują widoczne obniżenie wydajności i jakości pracy. W badaniach [17] rozważano także zależność dopuszczalnej prędkości przepływu powietrza od wartości izolacyjnej odzieży oraz rodzaju wykonywanej pracy (rys.5). Dla przyjętego zakresu intensywności pracy [17], przyjęto maksymalną prędkość przepływu powietrza $0,5 \text{ m/s}$. Wpływ zbyt dużej, lub zbyt małej zdolności chłodzącej otoczenia może być kompensowany odpowiednim doborem ubrania. Obszar prędkości powyżej $0,5 \text{ m/s}$ wyeliminowano, ze względu na stwierdzony u wielu osób wzrost pobudliwości nerwowej.

W innych badaniach [18], przeprowadzonych dla kilku wariantów rozdziału powietrza stwierdzono, że w pomieszczeniach ogólnego przeznaczenia nie powinno się przekraczać prędkości $0,3 \text{ m/s}$. Uwzględniając przy tym współzależność prędkości w strumieniu nawiewanym i w strefie przebywania ludzi jak też inne czynniki stanowiące o komforcie cieplnym.

Prędkości powietrza w strefie pracy najczęściej zawierają się w zakresach [19], przy ogrzewaniu powietrzem $0,2 - 0,45 \text{ m/s}$, przy chłodzeniu $0,1 - 0,3 \text{ m/s}$. Prędkości poniżej $0,05 - 0,1 \text{ m/s}$



Rys.5. Zależność dopuszczalnej prędkości przepływu powietrza od wartości izolacyjnej odzieży oraz rodzaju wykonywanej pracy (M_c - strumień ciepła wewnętrznego człowieka - W) F_D - średnia powierzchnia ciała wg Dubois - m² [17]

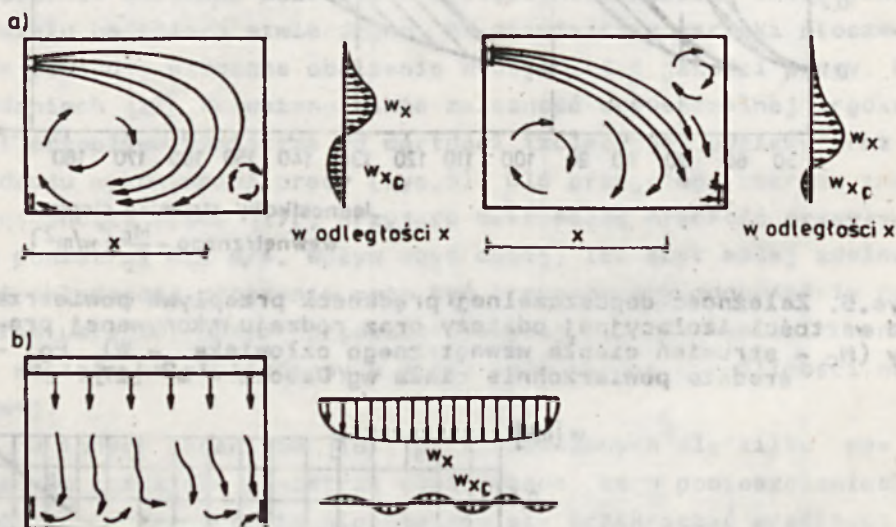


Rys.6. Powiązanie temperatury z dopuszczalną prędkością powietrza w strefie przebywania ludzi [19]

mogą wywoływać niekiedy uczucie duszności. Przy czym wartości liczbowe prędkości należy rozpatrywać w powiązaniu z innymi parametrami, a szczególnie temperaturą (rys.6).

5. CHARAKTERYSTYCZNE ELEMENTY ROZDZIAŁU POWIETRZA

Podstawowym elementem analizy efektywności działania wentylacji lub klimatyzacji jest uzyskanie żądanych parametrów. Wynika z tego rodzaj urządzenia oraz system nawiewu i wywiewu wymuszający przepływ powietrza przez pomieszczenie. Wiele zalet mają ustabilizowane przepływy laminarne przez pełny przekrój pomieszczenia, jednak w warunkach rzeczywistych w ich zrealizowaniu występuje wiele trudności technicznych. Praktyka zmusza do stosowania rozwiązań łatwiejszych technologicznie, choć dających mniejszą efektywność [20].



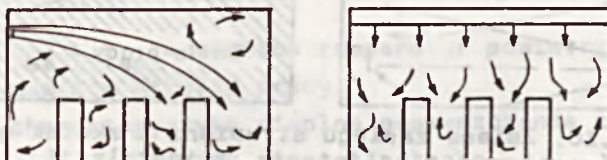
Rys.7. Rozdział powietrza przy nawiewie strumieniami nieizotermicznymi a - poziomymi, b - pionowymi; w_x - prędkość powietrza w strumieniu, w_{xc} - prędkość powietrza cyrkulacyjnego

Często stosowane są następujące rodzaje rozdziału powietrza:

a - nawiew strumieniami poziomymi (najczęściej nieizotermicznymi, rys.7a),

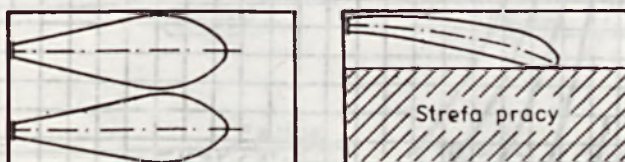
b - nawiew strumieniami pionowymi (rys.7b).

W przypadku wypełnienia strefy pracy urządzeniami, przepływ powietrza ulegnie znacznym deformacjom. Jak pokazano na rys.8 w przestrzeniach między urządzeniami (mogą to być także



Rys.8. Przepływ powietrza w strefie pracy wypełnionej urządzeniami

trakty komunikacyjne) pozostawać będą martwe przestrzenie, w których prędkość powietrza jest bliska 0 lub też sumujące się strumienie spowodować mogą zwiększenie prędkości. Zjawisko to jest szczególnie niekorzystne tam, gdzie prędkość powietrza jest narzucona względami technologicznymi. Natomiast powstające martwe pola mogą powodować nieoczekiwane zmiany mikroklimatu, np. przy występowaniu źródeł wilgoci nastąpić może podwyższenie wilgotności względnej powietrza.



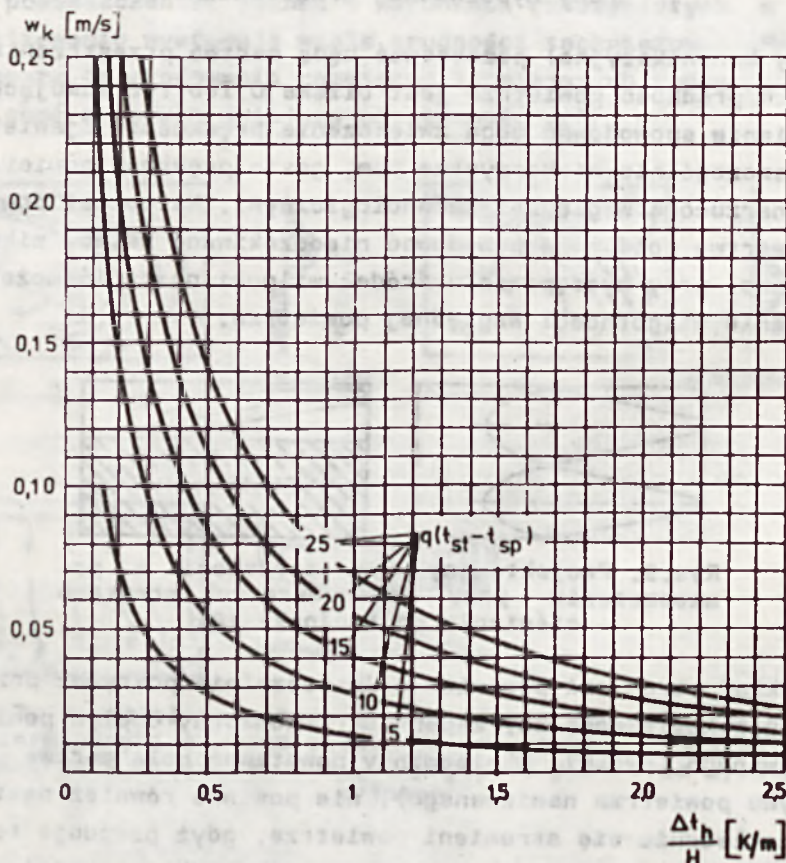
Rys.9. Projektowany układ strumieni w pomieszczeniu przy zrównoważonych stratach ciśnienia do trójkąta [21]

Układ strumieni powinien dość szczelnie pokrywać przestrzeń wentylowaną, aby zapewnić równomierny dopływ powietrza nawiewanego (rys.9). Nie powinny powstawać pola martwe (bez dopływu powietrza nawiewanego), nie powinno również następować nakładanie się strumieni powietrza, gdyż powoduje to trudne do opanowania miejscowe zmiany wynikowych prędkości. Warunki przepływu powietrza może zmienić deformacja wynikająca z na-

kładających się strumieni o zwiększonej w miejscu styku prędkości. W przypadku przedstawionym na rys.10 wydłużenie zasięgu i powiększenie szerokości strumienia spowoduje poślizg oraz odbicie od ściany przeciwległej, a zatem znaczne deformacje



Rys.10. Zmiana zasięgu strumieni na skutek nierówności strat ciśnienia w instalacji [21]



Rys.11. Zależność między prędkością w strumieniach konwekcyjnych a gradientem temperatury $\frac{\Delta t_h}{H}$ [22]

rozdziału powietrza. Nastąpi także obniżenie strumienia nieizotermicznego i wyraźne wejście w strefę pracy.

Określony wpływ na kształtowanie strumieni nawiewanych mają strumienie konwekcyjne powstające od źródeł ciepła zlokalizowanych w strefie pracy. Wzrost prędkości powietrza unoszonego w funkcji gradientu temperatury przedstawiono na rys.11

[22]

gdzie

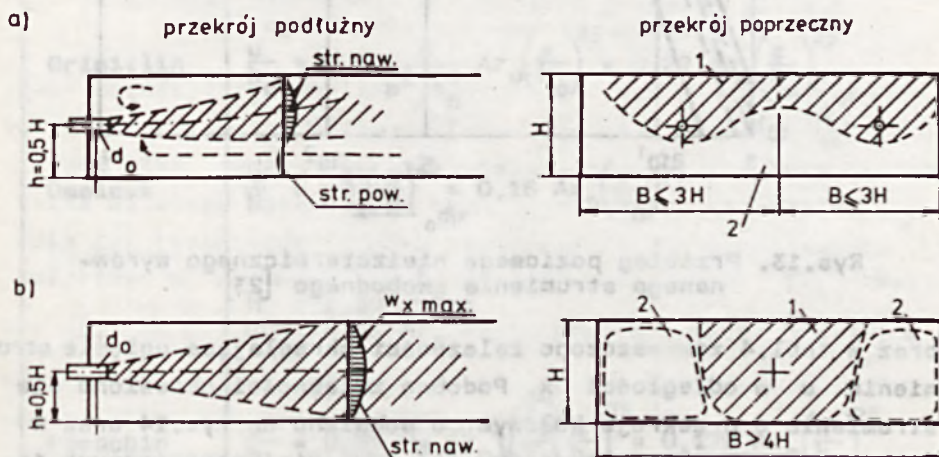
$\Delta t_h = t_{st} - t_{sp}$ - różnica temperatur powietrza pod stropem i w strefie pracy,

q - charakterystyka cieplna pomieszczenia z uwzględnieniem wszystkich strat ciepła,

w_k - prędkość w strumieniu konwekcyjnym,

H - wysokość pomieszczenia.

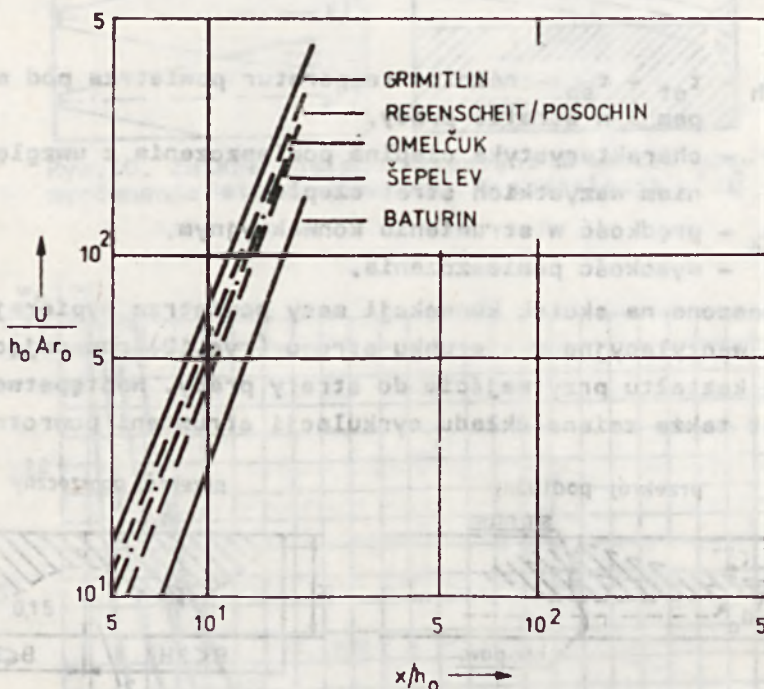
Unoszone na skutek konwekcji masy powietrza wypierają strumienie wentylacyjne w kierunku stropu (rys.12) powodując zmianę ich kształtu przy wejściu do strefy pracy. Następstwem tego jest także zmiana układu cyrkulacji strumieni powrotnych.



Rys.12. Rozdział strumieni powietrza przy nawiewie powietrza na wysokości $h = 0,5H$: a - przy szerokości pomieszczenia $B < 3H$; b - przy szerokości pomieszczenia $B > 4H$; 1 - strumień nawiewany; 2 - strumień powrotny [22]

H. S c h w e n k e [23] przedstawił badania związane z wpływem powietrza przez szczelinę usytuowaną wzdłuż ściany pomieszczenia oraz wpływem strumienia swobodnego o przekroju

kołowym. O wyrównanym strumieniu wypływającym ze szczeliny można mówić wtedy, kiedy otwór nawiewny umieszczony jest na całej szerokości pomieszczenia lub co najmniej $b_0 > 0,2x$ (gdzie b_0 jest długością nawiewnika), a także jeżeli prostokątne lub o przekroju kołowym otwory usytuowane są dość gęsto $[(t^u - b_0) < 0,2x]$ (gdzie t^u jest tzw. podziałką). Na rys.13



Rys.13. Przebieg poziomego nieizotermicznego wyrównanego strumienia swobodnego [23]

oraz w tabl.4 zamieszczono zależności określające ugięcie strumienia u w odległości x . Podobne zależności określono dla strumienia o przekroju kołowym co pokazano na rys.14 oraz w tablicy 5. Przy kształtowaniu strumieni nieizotermicznych istotnym parametrem jest liczba Archimedeasa Ar_0 i w funkcji tej liczby oceniono zmiany kształtu strumienia uwzględniające zasięg i wymiary geometryczne pomieszczenia rys.15, 16, 17.

Na tych rysunkach jedna z krzywych określona jest równaniem

$$\frac{u}{h_o} = 0,18 \text{ Ar}_o \left(\frac{x}{h_o} \right)^{2,5}, \quad (5)$$

gdzie

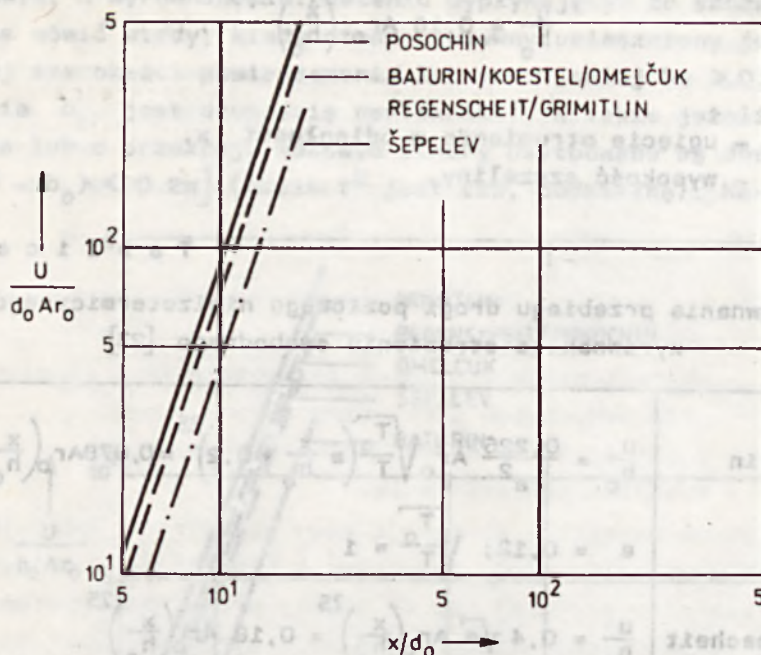
u - ugięcie strumienia w odległości x,

h_o - wysokość szczeliny.

T a b l i c a 4

Równania przebiegu drogi poziomego nieizotermicznego
wyrównanego strumienia swobodnego [23]

Baturin	$\frac{u}{h_o} = \frac{0,226}{a^2} \text{ Ar}_o \sqrt{\frac{T_o}{T}} \left(a \frac{x}{h_o} + 0,2 \right)^{2,5} = 0,078 \text{ Ar}_o \left(\frac{x}{h_o} + 1,7 \right)^{2,5}$ $a = 0,12; \sqrt{\frac{T_o}{T}} = 1$
Regenscheit	$\frac{u}{h_o} = 0,4 \sqrt{m} \text{ Ar}_o \left(\frac{x}{h_o} \right)^{2,5} = 0,18 \text{ Ar}_o \left(\frac{x}{h_o} \right)^{2,5}$
Grimitlin	$\frac{u}{h_o} = 0,7 \frac{n}{m^2 K_B^3} \text{ Ar}_o \left(\frac{x}{h_o} \right)^{2,5} = 0,22 \text{ Ar}_o \left(\frac{x}{h_o} \right)^{2,5}$
Omeičuk	$\frac{u}{H} = \frac{4}{15} \left(\frac{x}{H} \right)^{2,5} = 0,16 \text{ Ar}_o \left(\frac{x}{h_o} \right)^{2,5}$ $H = 1,39 \frac{h_o}{\text{Ar}_o^{2/3}}$
Posochin	$\frac{u}{h_o} = 0,54 \frac{n}{m^2} \text{ Ar}_o \sqrt{\frac{T_o}{T}} \left(\frac{x}{h_o} \right)^{2,5} = 0,176 \text{ Ar}_o \left(\frac{x}{h_o} \right)^{2,5}$
Šepelev	$\frac{u}{h_o} = 0,132 \frac{1}{\psi^3} \text{ Ar}_o \sqrt{\frac{T_o}{T}} \left(\frac{x}{h_o} \right)^{2,5} = 0,132 \text{ Ar}_o \left(\frac{x}{h_o} \right)^{2,5}$



Rys.14. Przebieg poziomego nieizotermicznego zaokrąglonego strumienia swobodnego [23]

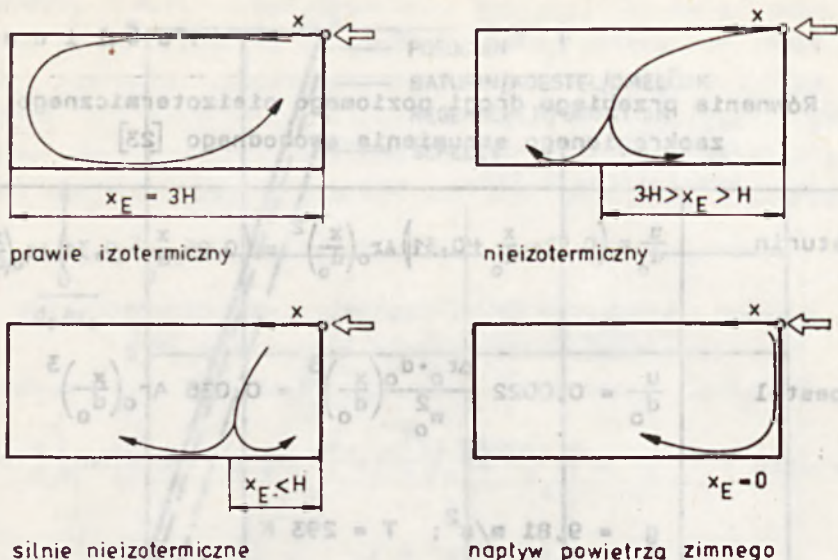
Przeprowadzono także badania dla sal amfiteatralnych [24]. Pozwoliły one na określenie współzależności między ruchami powietrza wentylacyjnego a wymiarami geometrycznymi sal. Pochylenie amfiteatru scharakteryzowano wskaźnikiem kształtu sali, tj. stosunkiem średniej wysokości sali do całkowitej jej długości H_{gr}/l_s . W badaniach zmieniano ten stosunek w zakresie $\frac{1}{4} \geq \frac{H_{gr}}{l_s} \geq \frac{1}{3}$ przy nawiewie powietrza od przodu lub od tyłu sali. Przy nawiewie od przodu, tj. przy przepływie strumieni nawiewanych w kierunku zmniejszającej się wysokości sali, graniczny zasięg strumieni x_{gr} wyraźnie zależy od stosunku $\frac{H_{gr}}{l_s}$ (rys.18). Przy nawiewie od tyłu sali graniczny zasięg strumieni nawiewanych praktycznie nie zależy od stosunku $\frac{H_{gr}}{l_s}$.

Rozdziałem powietrza w pomieszczeniach handlowych zajmowano się w poz.bibl. [25]. Uwidoczniono w nim wpływ przeszkód na kształtowanie się strumieni powietrza.

T a b e l i c a 5

Równania przebiegu drogi poziomego nieizotermicznego
zaokrąglonego strumienia swobodnego [23]

Baturin	$\frac{u}{d_0} = \left(0,72a \frac{x}{d_0} + 0,31\right) Ar_0 \left(\frac{x}{d_0}\right)^2 = \left(0,05 \frac{x}{d_0} + 0,31\right) Ar_0 \left(\frac{x}{d_0}\right)^2$
Koestel	$\frac{u}{d_0} = 0,0022 \frac{\Delta t_0 \cdot d_0}{w_0^2} \left(\frac{x}{d_0}\right)^3 = 0,036 Ar_0 \left(\frac{x}{d_0}\right)^3$ $g = 9,81 \text{ m/s}^2; \quad T = 293 \text{ K}$
Regenscheit	$\frac{u}{d_0} = 0,33 m Ar_0 \left(\frac{x}{d_0}\right)^3 = 0,066 Ar_0 \left(\frac{x}{d_0}\right)^3$
Grimitlin	$\frac{u}{d_0} = 0,6 \frac{n}{m^2 K_B^3} Ar_0 \left(\frac{x}{d_0}\right)^3 = 0,07 Ar_0 \left(\frac{x}{d_0}\right)^3$
Omeičuk	$\frac{u}{d_0} = 0,064 Ar_0 \sqrt{\frac{T_0}{T}} \left(\frac{x}{d_0}\right)^3 = 0,064 Ar_0 \left(\frac{x}{d_0}\right)^3$ $\sqrt{\frac{T_0}{T}} = 1$
Posochin	$\frac{u}{d_0} = 0,082 Ar_0 \sqrt{\frac{T_0}{T}} \left(\frac{x}{d_0}\right)^3 = 0,082 Ar_0 \left(\frac{x}{d_0}\right)^3$
Šepelev	$\frac{u}{d_0} = 0,41 \frac{1}{\psi^3} Ar_0 \sqrt{\frac{T_0}{T}} \left(\frac{x}{d_0}\right)^3 = 0,041 Ar_0 \left(\frac{x}{d_0}\right)^3$ $\psi = 1$

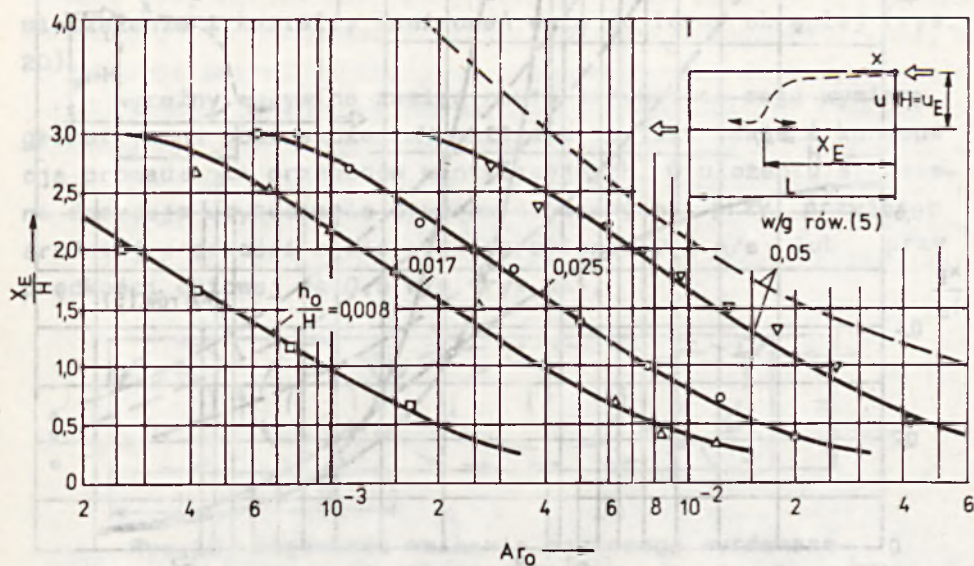


Rys.15. Charakterystyka ruchu strumienia wyrównanego nieizotermicznego poprzez głębokość wnikań x_E [23]

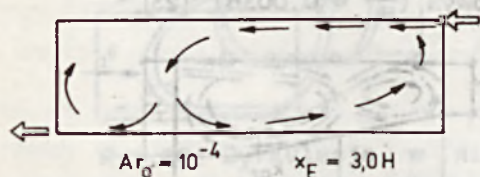
W trakcie badań modelowych porównywano rozdział powietrza w salach z przeszkodami i w salach pustych. Ustalono, że ustawienie mebli prostopadle do osi strumienia nawiewnych zmniejsza jego zasięg o około 5% przy ich wysokości $h = \frac{1}{4} H$, a około 12% przy wysokości $h = \frac{1}{2,5} H$. W drugim przypadku w przestrzeniach między meblami wystąpiły prędkości 0,1 - 0,2 m/s. Natomiast przy równoległym ustawieniu mebli w stosunku do osi strumienia zasięg strumienia zmniejszył się o 7%. Strumienie konwekcyjne od ludzi przy maksymalnym wypełnieniu sali sprzedaży $\frac{0,5 \text{ osoby}}{\text{m}^2 \text{ pow.sali}}$ powodują nieznaczne zmniejszenie zasięgu strumienia nawiewnych (około 2%) bez znacznych zakłóceń prędkości przepływu.

Interesującym zagadnieniem jest także wpływ kształtu pomieszczenia na właściwości ruchu strumienia. Charakteryzują ten ruch między innymi następujące właściwości [26]:

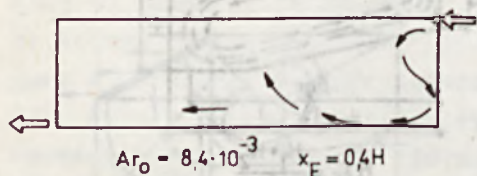
- pierwsze zawirowanie ma z powodu bezpośredniego oddziaływania impulsu powietrza formę eliptyczną, drugie zawirowanie wyróżnia się formą cyrkulacyjną symetryczną, w narożniku pomieszczenia wykształca się wir narożny E (rys.19),



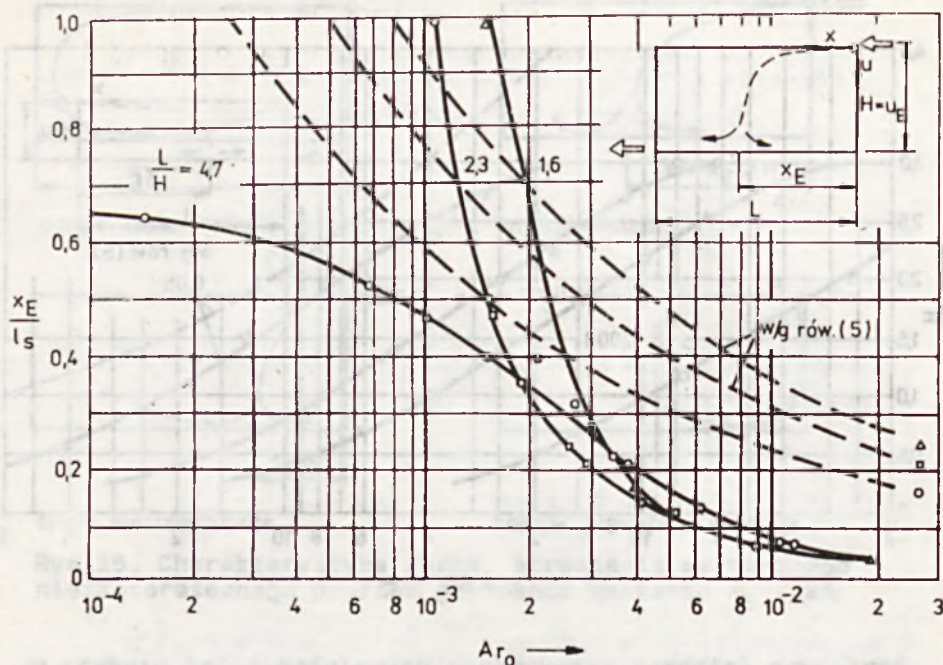
- a) Przebieg strumienia w zależności od wysokości szczeliny h_0



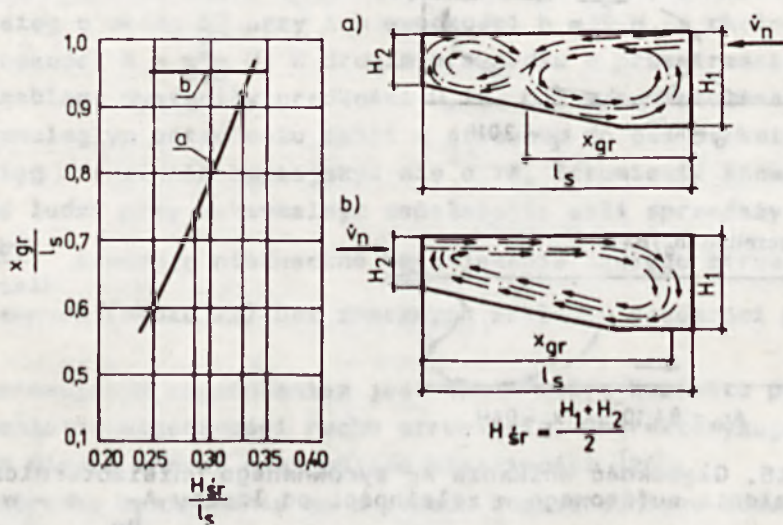
- b) Szczelina $h_0/H = 0,017$



Rys.16. Głębokość wnikań X_E wyrównanego nieizotermicznego strumienia sufitowego w zależności od liczby Ar : a - w zależności od wysokości szczeliny h_0 , b - przy $\frac{h_0}{H} = 0,017$ [23]



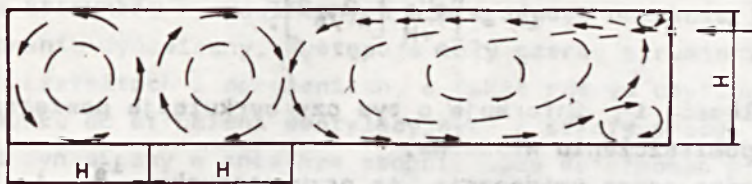
Rys.17. Głębokość wnikania x_E przy wyrównanym nieizotermicznym strumieniu sufitowym ($\frac{h_0}{H} = 0,0036$) [23]



Rys.18. Zależność granicznego zasięgu strumieni nawiewnych x_{gr} od stosunku wymiarów $\frac{H_{gr}}{l_s}$ dla prostokątnych sal amfiteatralnych wypełnionych ludźmi: a - nawiew wzdłuż sali od przodu, b - nawiew wzdłuż sali od tyłu [24]

- cyrkulacja powietrza w pomieszczeniu przy niekorzystnych stosunkach geometrycznych przebiega ukośnie w stosunku do pomieszczenia i kształty zawirowań dążą do formy okrągłej (rys. 20),

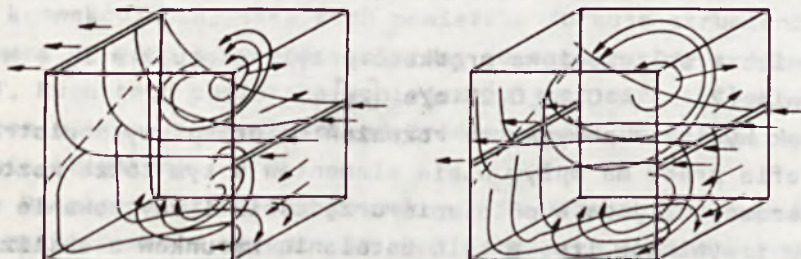
- wyraźny wpływ na zasięg rzutu strumienia mają wymiary geometryczne pomieszczenia, związane to jest także z koncepcją prowadzenia przewodów wentylacyjnych. O ułożeniu strumienia decyduje usytuowanie otworów nawiewnych przy przyjęciu średniej prędkości zamierania strumienia 0,2 m/s lub przy prędkości osiowej do 0,5 m/s (rys.21).



Rys.19. Głębokość wnikania poziomego wyrównanego strumienia [26]



Rys.20. Cyrkulacja w niskich pomieszczeniach przy zaokrąglonych pojedynczych nawiewach $\frac{B}{H} > 1$ [26]



Rys.21. Cyrkulacja w pomieszczeniu w kształcie sześcianu wg Linke [26]

Dla umożliwienia oceny cyrkulowania powietrza w pomieszczeniu wprowadzono wielkość określoną jako najmniejszy impuls w pomieszczeniach z nawiewem punktowym oznaczony i' . Wielkość impulsu określa się według masy wirów i strat tarcia strumienia (tarcie wewnętrzne, tarcie ścian). Dla dwuwymiarowych strumieni (wyrównany walec przestrzenny) zostały potwierdzone doświadczalnie i teoretycznie następujące związki [26] przy zasięgu $x = l_s + H$ nawiewany impuls powietrza określony jest zależnością

$$i' = \frac{w_o^2 h_o}{l_s + H} \left[m^2/s^2 \right]. \quad (6)$$

Wielkość i' informuje o tym czy cyrkulacja powietrza jest w pomieszczeniu właściwa.

Wstępna ocena uwidacznia, że przy stosunku $\frac{l_s}{H} = 1 + 3$ można przewidywać wpływ pomieszczenia z błędem $\pm 20\%$. Porównując równanie (6) z równaniem swobodnego wyrównanego strumienia (7)

$$\frac{w_x}{w_o} = \sqrt{K_o \frac{h_o}{x}} \quad (7)$$

definiuje się najmniejszą prędkość w_x , przy której jest zachowana wyraźna cyrkulacja. Przy dolnej granicy wentylacji nawiewnej punktowej został określony najmniejszy impuls przy szerokości pomieszczenia 1 m i długości strumienia $l_s + H$ na

$$i' = 3 \div 5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$$

i najniższa obliczeniowa prędkość przy zasięgu $x = l_s + H$ wg równania (7) $w_x = 0,2 \div 0,25 \text{ m/s}$ [26].

Jak wynika z powyższych rozważań na przepływy powietrza w strefie pracy ma wpływ wiele elementów w tym także kształt pomieszczenia, jego wypełnienie urządzeniami usytuowanie nawiewów i wywiewów itp. W celu ustalenia warunków stabilizacji strumienia muszą być prowadzone prace dla określenia wszystkich elementów decydujących o kształtowaniu strumieni wentylacyjnych.

6. PRZYCZYNY ZMIAN KSZTAŁTU NAWIEWANYCH STRUMIENI POWIETRZA

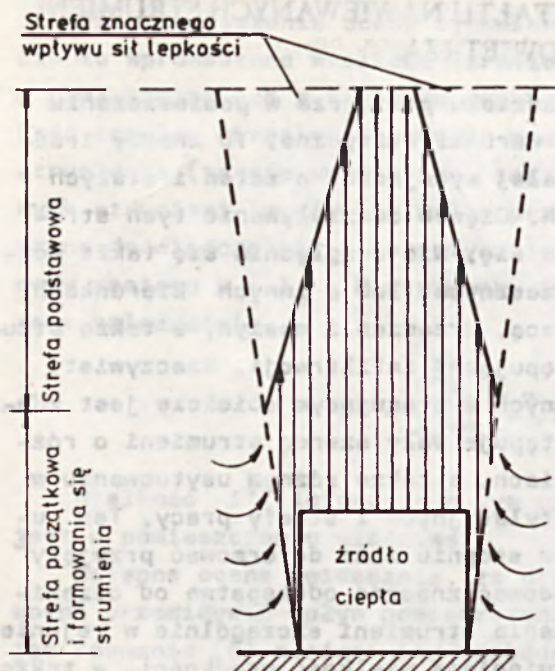
Opracowując metody rozdziału powietrza w pomieszczeniu przyjmuje się najczęściej warunki statyczne. To znaczy źródła ciepła o określonej stałej wydajności a zatem i stałych strumieniach konwekcyjnych. Często oddziaływanie tych strumieni konwekcyjnych pomija się. Nie uwzględnia się także możliwości występowania poprzecznych, lub o innych kierunkach, strumieni wywoływanych pracą, urządzeń i maszyn, a także strumieni wynikających z występującej infiltracji. Rzeczywisty stan stosunków hydraulicznych w pracującym obiekcie jest zdecydowanie dynamiczny. Występuje cały szereg strumieni o różnych kształtach i natężeniach, a także różnym usytuowaniu w stosunku do strumieni wentylacyjnych i strefy pracy. Ten układ dynamiczny w znacznym stopniu może deformować przyjęty rozdział powietrza i powodować znaczne odstępstwa od oczekiwanej efektywności. Zderzenia strumieni szczególnie w rejonie wejścia do strefy pracy zmieniają wielkość prędkości, a także jej kierunek.

Istnieje zatem konieczność określenia jakie jest dopuszczalna deformacja strumieni bez wyraźnych negatywnych skutków wynikających z działania wentylacji.

6.1. STRUMIENIE KONWEKCYJNE SWOBODNE

Urządzenia lub przedmioty o temperaturze powierzchni wyższej od temperatury otoczenia są źródłem powstawania strumieni konwekcyjnych. Taki ruch powietrza formuje strumienie skierowane do góry o energii zależnej od temperatury źródła (rys. 22). Ruch tego powietrza zmniejszany jest siłami lepkości, a zatem w pewnej odległości od źródła ciepła następuje wyhamowanie strumienia.

Działanie strumieni konwekcyjnych w znacznym stopniu wpływa na formowanie strumienia wentylacyjnego i ostateczny jego kształt w obszarze napływu do strefy pracy. Parametrem charakteryzującym występujące siły wyporu i siły bezwładności jest

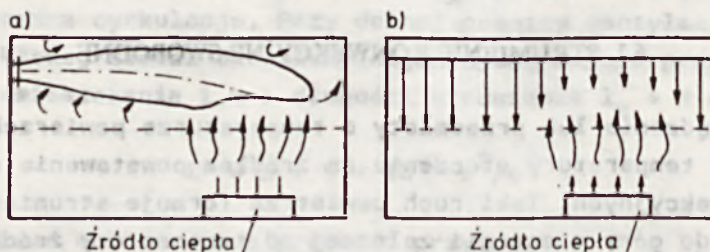


Rys.22. Konwekcyjny strumień powietrza powstający nad źródłem ciepła

cyrkulacji powietrza oraz mogą deformować przyjęty rozdział powietrza. W przypadku działania silnych strumieni konwekcyj-

liczba Archimedeśa Ar . Interesujące badania wykonał Gr im i t l i n [27], celem ich było określenie oddziaływania między nawiewanym strumieniem ciepłego powietrza i występującymi siłami wyporu pochodzącymi od źródeł ciepła. Przedmiotem badań był strumień osiowo symetryczny. Stwierdzono, że siły wyporu przy nawiewie w dół mają wyraźny, hamujący wpływ oraz powodują wcześniejsze zahamowanie strumienia.

Występujące w pomieszczeniu źródła ciepła, powodują zmianę układu



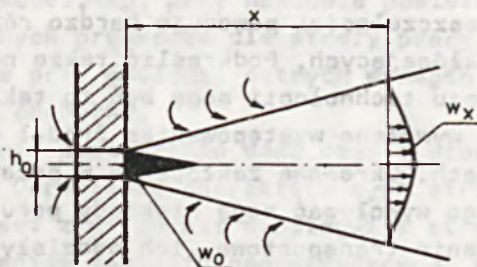
Rys.23. Zmiana kształtu strumieni pod wpływem konwekcyjnych strumieni powietrza: a - nawiew nieizotermiczny poziomy, b - nawiew nieizotermiczny od góry

nych przy nawiewie poziomym lub pionowym góra-dół, strumienie mogą być tak silnie wyhamowane, że będą one zamierać powyżej strefy pracy, jak to przykładowo pokazano na rys.23. Ponadto

strumienie konwekcyjne deformują strumienie nawiewane na obszarze większym niż powierzchnia zajmowana przez źródła ciepła.

6.2. STRUMIENIE OD INFILTRACJI POWIETRZA ZEWNĘTRZNEGO MASZYN, URZĄDZEŃ I ELEMENTÓW RUCHOMYCH

Strumienie powietrza napływające do pomieszczenia na skutek infiltracji, są najczęściej strumieniami płaskimi. Wynika to z technologii budowy obiektów, gdzie najczęściej występują szczeliny w miejscach połączeń elementów budowlanych, między ścianami oknami, drzwiami, bramami. Konstrukcja szczelin dość często przypadkowa wynikająca z niewłaściwego wykonania połączeń elementów, wpływa na charakter przepływu strumienia, a także jego ukształtowanie. Zasięg



Rys.24. Wpływ izotermicznego strumienia powietrza przez szczelinę [28]

strumienia wypływający z długiej szczeliny jest większy niż dla innego wylotu [28]. Uzasadnione jest to zjawiskiem, że strumień nie rozszerza się w kierunku bocznym i spadek prędkości osiowej strumienia w_x jest znacznie mniejszy niż przy wypływie z otworów kołowych (rys.24).

Spadek prędkości osiowej jest odwrotnie proporcjonalny do pierwiastka kwadratowego z odległości x od płaszczyzny wylotu szczelinowego zgodnie ze wzorem

$$\frac{w_x}{w_0} = 2,5 \sqrt{\frac{h_0}{x \mu \epsilon}}, \quad (8)$$

gdzie

h_0 - wysokość szczeliny [m],

μ - współczynnik kontrakcji,

ϵ - współczynnik przesłonięcia wylotu, oraz zasięg strumienia L dla prędkości końcowej $w_k = 0,5 \text{ m/s}$

$$L = 25 w_0^2 \frac{h_0}{\mu \epsilon} [\text{m}]. \quad (9)$$

O przepływie powietrza przez przegrody budowlane decyduje różnica ciśnień po obu stronach przegrody [29]. Następnym czynnikiem jest kształt szczeliny, który określi współczynnik strat miejscowych a w efekcie straty ciśnienia przy przepływie przez szczelinę. Wpływ powietrza ze szczelin obudów urządzeń i maszyn może mieć bardzo różny charakter. Od klasycznie ukształtowanych szczelin oraz wylotów punktowych do szczelin o bardzo skomplikowanych kształtach. Taka różnorodność rodzajów nieszczelności powoduje bardzo różne ukształtowanie strumieni zakłócających. Podkreślić także należy, że w zależności od rodzaju technologii mogą być to także strumienie nieizotermiczne wywołane występowaniem źródeł ciepła w maszynach i urządzeniach. Okresowe zakłócenia w przepływie strumienia wentylacyjnego wywoływać mogą niekiedy poruszające się cyklicznie urządzenia transportowe, ich oddziaływanie będzie bardziej znaczące dla zabezpieczenia przed wznoszeniem drobnych frakcji zanieczyszczeń.

7. STRUMIENIE POWIETRZA NAWIEWANEGO POZIOMO

Ostateczne ukształtowanie warunków przepływu powietrza w strefie pracy jest wypadkową przyjętego systemu nawiewu i wywiewu powietrza oraz wszystkich zakłócających ten przepływ oddziaływań zewnętrznych. Wymagany przepływ powietrza przez strefę pracy uzyskać można różnymi metodami rozdziału powietrza, ale istotny jest wybór układu efektywnego dla danych warunków jak również odpornego na możliwe deformacje.

Jednym z podstawowych elementów określających strumienie powietrza jest energia kinetyczna strumienia wyrażająca się iloczynem jego masy i kwadratu prędkości [13]. Wymagany poziom energii kinetycznej może zawierać jednak różne proporcje masy i prędkości strumienia. Istotno jest zatem, aby ta proporcja określona była zgodnie z wymaganym kształtem i prędkością wejścia strumienia do strefy pracy.

Wzajemny układ strumieni, ich profil, zdolność mieszania się z powietrzem otoczenia określa ostatecznie kształt i poziom energii kinetycznej strumieni na wejściu do strefy pracy. Jest to stan wyjściowy dla ukształtowania przepływu powietrza przez strefę pracy z uwzględnieniem wymagań dotyczących równomierności rozkładu prędkości i temperatury powietrza. Najbardziej korzystny byłby równomierny rozkład prędkości w całej strefie, jednak często zdarza się, że ze względów technologicznych lub użytkowych wysokie wymagania formułowane są w stosunku do części strefy pracy, a w pozostałych rejonach dopuszcza się pewne odchyłki prędkości. Np. przy nawiewie powietrza góra-dół można żądać stabilnych prędkości dla strefy pracy na wysokości 1,5 m, a dla 0,5 m przy podłodze ostrych wymagań nie stawiać, dopuszczając pewne odchyłki.

W praktycznym wentylowaniu pomieszczeń dość często stosowane są strumienie poziome. Określenie charakteru tych strumieni, ich zasięgu, związane jest z warunkami cieplnymi w strefie przepływu a także oddziaływaniem kształtu geometrycznego pomieszczeń. Szczególnie od warunków bilansu ciepła zależeć będzie czy strumień powietrza będzie izotermiczny, słabo izotermiczny czy nieizotermiczny. Jeżeli temperatura strumienia nawiewanego różni się od temperatury powietrza w pomieszczeniu to występować będą siły wyporu odchylające strumień w górę lub w dół. Parametrem charakteryzującym siły wyporu jest liczba Archimedesza, Ar

$$Ar = g \frac{\Delta t}{T_p} \frac{p}{\rho} \frac{d}{w_o^2} \quad (10)$$

gdzie

g - przyspieszenie siły ciężkości $[m/s^2]$,

Δt - różnica temperatur między powietrzem nawiewanym a powietrzem w pomieszczeniu $[K]$,

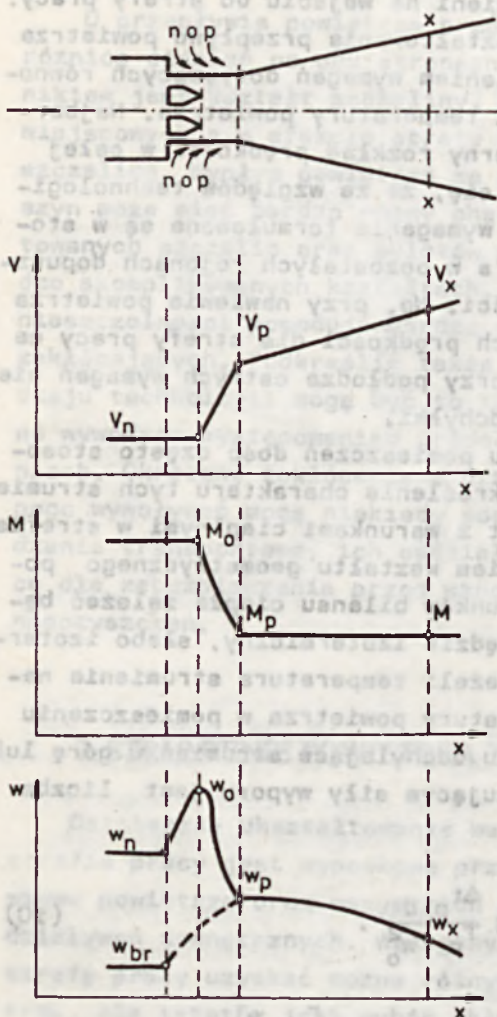
T_p - temperatura w pomieszczeniu $[K]$,

d - średnica otworu nawiewnego $[m]$,

w_o - prędkość wypływu powietrza $[m/s]$.

Stopień nieizotermiczności strumienia w znacznym stopniu wpływa na sposób podsysania powietrza z pomieszczenia i osta-

teczne kształtowanie strumienia. Zwłaszcza w strefie początkowej wyraźne oddziaływanie ma rodzaj uzbrojenia wylotu. W prak-



Rys.25. Przyrost objętości strumienia, strata pędu, zmiany prędkości w strumieniach jednostkowych i w strumieniu całkowitym przy wypływie powietrza z otworu uzbrojonego [30]

tyce często są stosowane różnego rodzaju obudowy, jednak początkowe rozbitcie na jednostkowe strumienie w ostatecznym efekcie i tak sprowadza się do uformowania jednolitego strumienia. W takim przypadku występuje jednak strata pędu strumienia (rys. 25) określona współczynnikiem η [30]

$$M_n = \eta \cdot M_p \quad (11)$$

gdzie

η - współczynnik straty pędu w obszarze formowania się strumienia ($\eta > 1$),

M_n - pęd strumienia powietrza w płaszczyźnie wylotu,

M_p - pęd strumienia powietrza w przekroju początkowym.

Poza przekrojem początkowym pęd strumienia powietrza nie ulega zmianie, tj.

$$M_x \approx M_p \approx \frac{1}{\eta} M_n$$

M_x - pęd strumienia powietrza w przekroju w odległości x .

Widoczny wpływ na kształtowanie strumienia swobodnego ma początkowa turbulencja strumienia, tj. przed wyjściem z otworu wylotowego. Przy wzroście początkowej turbulencji strumie-

nia wzrasta także jego mieszanie z powietrzem otaczającym, co powoduje rozszerzenie strumienia, skrócenie długości odcinka początkowego oraz przyspieszone wytracanie prędkości osiowej za przekrojem przejściowym [31].

Przy nawiewaniu swobodnego strumienia powietrza istotny jest jego początkowy stopień burzliwości [32]. Przy czym najczęściej wykorzystuje się przepływ w warunkach burzliwych. Musi być zatem spełnione kryterium liczby Reynoldsa'a

$$Re = \frac{w_{o \min} \cdot d}{\nu} = \frac{1,13 \sqrt{F_{br}} w_{o \min}}{\nu} \geq 2320, \quad (12)$$

gdzie

$w_{o \min}$ - prędkość przepływu powietrza odniesiona do całkowitego przekroju nawiewnika [m/s],

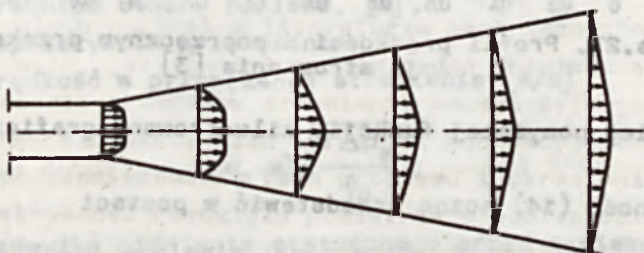
d - średnica otworu nawiewnego [m],

F_{br} - powierzchnia całkowita (brutto) nawiewnika [m²],

ν - współczynnik lepkości kinematycznej [m²/s].

Dla $\nu = 14,9 \cdot 10^{-6}$ [m²/s], oraz $t = 20$ [°C], $\varphi = 50$ [%]
 $p = 10^5$ [N/m²] będzie

$$w_{o \min} \geq \frac{0,0306}{\sqrt{F_{br}}} \text{ [m/s]}. \quad (13)$$



strefa strefa strefa podstawowa
 początkowa przejściowa

Rys.26. Profile prędkości wzdłuż strumienia osiowo-symetrycznego

Należy także podkreślić, że w strumieniach osiowo-symetrycznych profile prędkości w przekrojach poprzecznych strefy podstawowej są podobne, co pokazano na rys.26.

Profile prędkości w poprzecznych przekrojach strumienia mogą być określone zależnością bezwymiarową określoną jako funkcja według G r i m i t l i n a [33]

$$\frac{w_y}{w_x} = f\left(\frac{y}{y_{0,5}}\right), \quad (14)$$

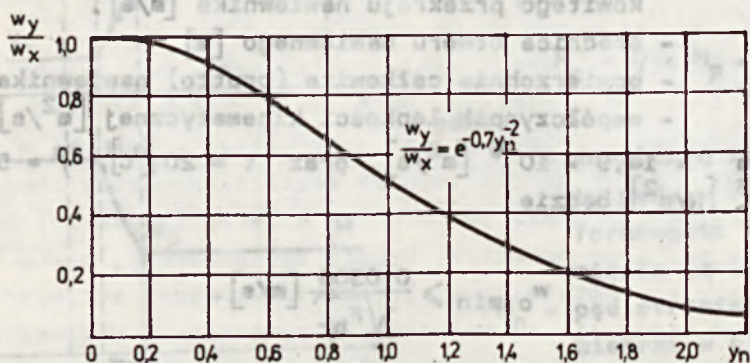
gdzie

w_y - prędkość w odległości y od osi strumienia [m/s],

w_x - prędkość w osi strumienia [m/s],

$y_{0,5}$ - odległość od osi do punktów strumienia, w których prędkość jest równa połowie prędkości osiowej [m],

y - odległość od osi geometrycznej nawiewnika [m].



Rys.27. Profil prędkości w poprzecznym przekroju strumienia [3]

Przebieg powyższej funkcji, zilustrowano graficznie na rys.27.

Zależność (14) można przedstawić w postaci

$$\frac{w_y}{w_x} = e^{-0.7 y_n^2}, \quad (15)$$

gdzie

y_n - bezwymiarowa odległość jest stosunkiem

$$y_n = \frac{y}{y_{0,5}}.$$

Ponieważ

$$y_{0,5} = x \operatorname{tg} \alpha_{0,5}$$

to

$$\frac{w_y}{w_x} = e^{-py^2}, \quad (16)$$

gdzie

$$p = \frac{0,7}{x^2 \operatorname{tg}^2 \alpha_{0,5}}.$$

Przy wypływie przez okrągły otwór nieuzbrojony pęd początkowy w płaszczyźnie wylotu nawiewnika wg Grimiłina jest równy [33]

$$M_0 = \rho_0 \frac{\pi d_0^2}{4} \cdot \varepsilon \cdot \mu \cdot w_1^2, \quad (17)$$

gdzie

ε - współczynnik przesłonięcia wylotu (dla wylotu nieuzbrojonego $\varepsilon = 1$),

ρ_0 - gęstość czynnika, $[\text{kg/m}^3]$,

d_0 - średnica otworu nawiewu, $[\text{m}]$,

μ - współczynnik przewężenia,

w_1 - prędkość w przewężeniu strumienia, $[\text{m/s}]$

$$w_1 = \sqrt{\frac{2 \Delta p_s}{\rho_0}},$$

Δp_s - nadwyżka ciśnienia statycznego przed nawiewnikiem, $[\text{Pa}]$,

w_0 - prędkość odniesiona do powierzchni brutto, $[\text{m/s}]$,

ζ - współczynnik strat miejscowych,

V_0 - objętość strumienia masy wypływającego z nawiewnika

$$w_0 = \frac{V_0}{\frac{\pi d_0^2}{4}} = \frac{4 V_0}{\pi d_0^2},$$

ponieważ

$$w_1 = \frac{w_0}{\mu \cdot \varepsilon} , \quad \zeta = \frac{1}{(\mu \cdot \varepsilon)^2}$$

to

$$(21) \quad M_0 = \rho_0 \frac{\pi d_0^2}{4} w_0^2 \sqrt{\zeta} . \quad (18)$$

Pęd w dowolnym poprzecznym przekroju strumienia

$$M_x = 2\pi \int_{y=0}^{y=\infty} \rho_0 \cdot w_y^2 \cdot y \cdot dy . \quad (19)$$

Przyjmując, że gęstość w podstawowej strefie jest w przybliżeniu równa gęstości powietrza otaczającego i że

$$(22) \quad w_y = w_x e^{-py^2} ,$$

będzie

$$\begin{aligned} M_x &= 2\pi \rho_0 w_x^2 \int_{y=0}^{y=\infty} e^{-2py^2} y dy = \\ &= -\frac{2\pi \rho_0 w_x^2}{4p} \int_{y=0}^{y=\infty} e^{-2py^2} d(-2py^2) = \frac{\pi \rho_0 w_x^2}{2p} . \end{aligned} \quad (20)$$

Tak określony pęd strumienia w dowolnym przekroju w odległości x , jest jednym z elementów pozwalających na określenie przepływu powietrza w rozpatrywanej strefie pomieszczenia.

Prędkość w osi rozpatrywanego przekroju S z e p i e l e w [34] w oparciu o przeprowadzone eksperymenty określił następująco

$$w_x = \frac{1}{\sqrt{\pi} C} \sqrt{\frac{I_0}{\rho}} \frac{1}{x} , \quad (21)$$

lub

$$w_x = \frac{\theta \varphi}{\sqrt{\pi} C} \frac{w_0 \sqrt{F_0}}{x} ,$$

gdzie

$$\theta - \text{współczynnik} \left(\theta = \sqrt{\frac{\rho_o}{\rho_p}} = \sqrt{\frac{T_p}{T_o}} \right),$$

indeksy oznaczają

o - wypływ

p - pomieszczenie

dla strumieni izotermicznych $\theta = 1$

C - stała wyznaczona eksperymentalnie, której wartość określono jako 0,082,

φ - współczynnik uwzględniający nierównomierny wypływ powietrza z otworu nawiewnego

$$\varphi = \left[\int_0^1 \left(\frac{w}{w_o} \right)^2 d \left(\frac{F}{F_o} \right) \right]^{1/2}$$

przy wypływie równomiernym $\varphi = 1$, w_o jest średnią prędkością w otworze odniesioną do powierzchni otworu F_o , w - prędkość powietrza w dowolnym punkcie rozpatrywanego przekroju.

Dla uproszczenia zapisu Szepielew wprowadził współczynnik zastępczy m

$$m = \frac{\theta \varphi}{\sqrt{\pi} C}.$$

a zatem będzie

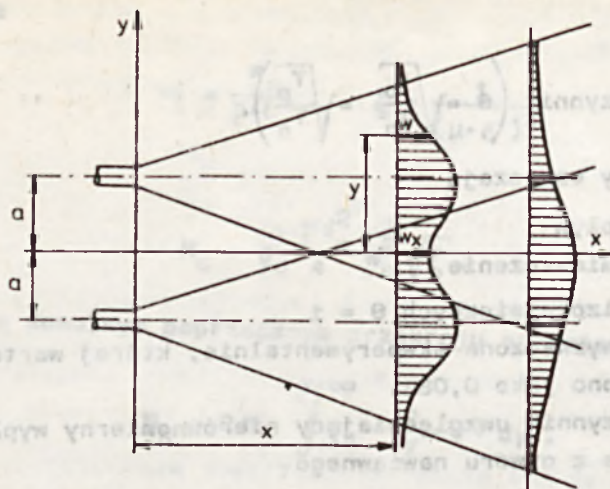
$$w_x = \frac{m w_o \sqrt{F_o}}{x}. \quad (22)$$

Dla strumienia izotermicznego, przy równomiernym wypływie z otworu, $m = 6,88$ (wg Szepielewa) wzór (22) przyjmie postać

$$w_x = \frac{6 w_o d_o}{x}. \quad (23)$$

Przy określaniu warunków zorganizowanego nawiewu powietrza istotny jest problem wzajemnego oddziaływania strumieni.

Dla równoległych strumieni powietrza nawiewanych wzdłuż osi x [34], usytuowanych jak pokazano na rys.28, prędkość wy-



Rys.28. Przenikające się równoległe strumienie powietrza nawiewane wzdłuż osi x [34]

padkową w określonym punkcie przekroju strumieni można w przybliżeniu obliczyć następująco

$$w^2 = w_1^2 + w_2^2, \quad (24)$$

w_1 - prędkość strumienia pierwszego przy swobodnym pojedynczym wypływie

$$w_1 = \frac{mw_o \sqrt{F_o}}{x} e^{-py_{r1}^2}, \quad (25)$$

w_2 - prędkość strumienia drugiego przy swobodnym pojedynczym wypływie

$$w_2 = \frac{mw_o \sqrt{F_o}}{x} e^{-py_{r2}^2}. \quad (26)$$

Odległość rozpatrywanego punktu od osi strumienia pierwszego oraz drugiego będzie w układzie przestrzennym odpowiednio wynosiła

$$y_{r1} = [(y - a)^2 + z^2]^{1/2},$$

oraz

$$y_{r2} = [(y + a)^2 + z^2]^{1/2}.$$

Równanie (24) opisujące prędkość wypadkową w przyjętej postaci

$$w = \frac{mw_o \sqrt{F_o}}{x} e^{-pz^2} \left[e^{-p(y-a)^2} + e^{-p(y+a)^2} \right]^{1/2} \quad (27)$$

Przy rozpatrywaniu wspólnego przepływu strumieni w płaszczyźnie x, y , czyli przy $z = 0$, prędkość w według Szepielewa będzie wynosiła [34]:

$$w = \frac{mw_o \sqrt{F_o}}{x} \left[e^{-p(y-a)^2} + e^{-p(y+a)^2} \right]^{1/2} \quad (28)$$

Wypadkowa prędkość na osi x (rys.28), gdzie wystąpi jej najwyższa wartość, może być określona z wzoru (28) przyjmując $y = 0$

$$w_{xw} = \frac{mw_o \sqrt{F_o}}{x} e^{-(pa)^2} \quad (29)$$

gdzie

w_{xw} - prędkość wypadkowa z dwóch strumieni w osi x .

7.1. OPIS MODELU OBLICZENIOWEGO

Ze względu na brak w literaturze technicznej opracowań teoretycznych, jak również opisów badań doświadczalnych na temat zakłócenia przepływu strumienia wentylacyjnego strumieniem poprzecznym (z wyłączeniem strumieni konwekcyjnych), konieczne jest przeanalizowanie tego problemu i określenie jego wpływu na efektywność rozdziału powietrza w pomieszczeniu.

Wielkość zagadnienia i różnorodność występujących w praktyce przypadków zmusił autora do ograniczenia zakresu wynikającego z objętości pracy. Przeanalizowano oraz zbadano skutki zakłócenia poziomo nawiewanego strumienia osiowo-symetrycznego, który pod kątem β zakłócany jest strumieniem płaskim wpływającym ze szczeliny o długości większej niż średnica strumienia zakłócanego w osi zakłócenia.

Dla określenia właściwości strumienia wypadkowego zastosowano metodę wektorowego sumowania pędów w miejscu zderzenia strumieni składowych.

kości osiowej ma wartość $2\tau_{0,5} = 10 - 12^\circ$, a zatem z pewnym przybliżeniem można przyjąć $\operatorname{tg}\tau_{0,5} = 0,1$

$$p_1 = \frac{0,7}{x_0^2 0,01} = \frac{70}{x_0^2}.$$

Dla strumienia zakłócającego odpowiednio będzie

$$w_{xz} = w_z \cdot 2,5 \sqrt{\frac{b_H}{y_0 \mu \varepsilon}}. \quad (31)$$

Przyjmując otwór nieuzbrojony $\varepsilon = 1$; $\mu = 0,9$; stąd

$$w_{xz} = 2,5 w_z \sqrt{\frac{b_H}{0,9 y_0}}.$$

Pęd strumienia zakłócającego w odległości y_0 będzie wynosił

$$M_{xz} = \frac{\rho w_{xz}^2 \sqrt{\pi}}{\sqrt{2 p_2}}, \quad (32)$$

dla $\operatorname{tg} \tau_{0,5}$ przyjętego jak poprzednio 0,1

$$p_2 = \frac{70}{y_0^2}.$$

W wyniku zderzenia strumieni o gęstościach powietrza ρ_0 i ρ_z powstanie strumień wypadkowy o gęstości ρ_{xy} wynikającej ze stosunku objętości strumieni w miejscu zderzenia. Dla znalezienia średniej gęstości określa się średnią prędkość w przekroju strumienia w odległości x_0

$$w_{\text{exp}} = \frac{0,095 w_0}{\frac{a_w x_0}{d_0} + 0,145}, \quad (33)$$

gdzie

$a_w = 0,08$ dla wylotu cylindrycznego bez przewężenia.

Powierzchnia przepływu strumienia wentylacyjnego w odległości x_0 wyniesie:

$$F_{\text{exp}} = \frac{\pi d_{\text{exp}}^2}{4},$$

$$d_{\text{exp}} = 2x_0 \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} + d_0,$$

γ - kąt rozszerzenia strumienia ($\operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} = 0,176$) $\gamma = 20^\circ$

$$d_{\text{exp}} = 0,352 \cdot x_0 + d_0,$$

czyli

$$F_{\text{exp}} = 0,785 (0,352x_0 + d_0)^2, \quad (34)$$

ilość powietrza będzie następująca

$$V_{\text{exp}} = w_{\text{exp}} \cdot F_{\text{exp}}. \quad (35)$$

Dla strumienia drugiego (płaskiego) [5]

$$w_{\text{xz}} = \frac{0,095 w_z}{\frac{0,12y_0}{b_H} + 0,145}, \quad (36)$$

$$F_{\text{xz}} = (0,352x_0 + d_0)(0,352y_0 + b_H) \quad (37)$$

$$V_{\text{xz}} = w_{\text{xz}} \cdot F_{\text{xz}}. \quad (38)$$

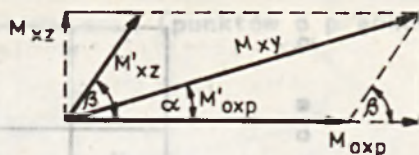
Średnia gęstość powietrza po zderzeniu strumieni będzie wynosiła

$$\rho_{xy} = \frac{\rho_0 V_{\text{exp}} + \rho_z V_{\text{xz}}}{V_{\text{exp}} + V_{\text{xz}}}. \quad (39)$$

Wartość pędu wypadkowego, na podstawie sumowania wektorowego pędów strumieni składowych zderzających się pod $\alpha\beta = 90^\circ$, można określić

$$M_{xy} = \sqrt{M_{\text{exp}}^2 + M_{\text{xz}}^2}. \quad (40)$$

Przy czym dla sumowania pędów zderzających się strumieni pod $\angle \beta \neq 90^\circ$, wypadkowy pęd należy obliczyć z uwzględnieniem zależności dla pędów składowych M_{oxp} i M_{xz} w oparciu o rys.30.



Rys.30. Układ wektorów przy strumieniach zderzających się pod kątem α

$$M_{xz} = M'_{xz} \cos(90 - \beta), \quad (41)$$

$$M_{oxp} = M'_{oxp} + M_{xz} \cos \beta, \quad (42)$$

gdzie

M'_{xz} , M'_{oxp} - wartość pędów składowych przy $\angle \beta \neq 90^\circ$.

Prędkość w rzeczywistej osi strumienia odchylonego o kąt α będzie

$$w'_x = \frac{6w_o d_o \frac{M_{xy}}{M_{oxp}}}{x_o + \frac{x - x_o}{\cos \alpha}} = \frac{6w_o d_o \frac{M_{xy}}{M_{oxp}}}{x_o + \frac{(x - x_o) M_{xy}}{M_{oxp}}}, \quad (43)$$

gdzie

$$\cos \alpha = \frac{M_{oxp}}{M_{xy}}.$$

Zasięg strumienia zakłóconego dla prędkości końcowej w osi strumienia w_k (najczęściej przyjmowana wartość $w_k = 0,5 \div 0,2$ m/s)

$$L_z = \frac{\cos \alpha}{w_k} \left(6 w_o d_o \frac{M_{xy}}{M_{oxp}} + \frac{w_k x_o}{\cos \alpha} - w_k x_o \right) \quad (44)$$

lub

$$L_z = \frac{M_{oxp}}{w_k M_{xy}} \left(6 w_o d_o \frac{M_{xy}}{M_{oxp}} + \frac{w_k x_o M_{xy}}{M_{oxp}} - w_k x_o \right).$$

Zasięg podstawowego strumienia wentylacyjnego wyniesie

$$L_p = \frac{6 w_o d_o}{w_k}. \quad (45)$$

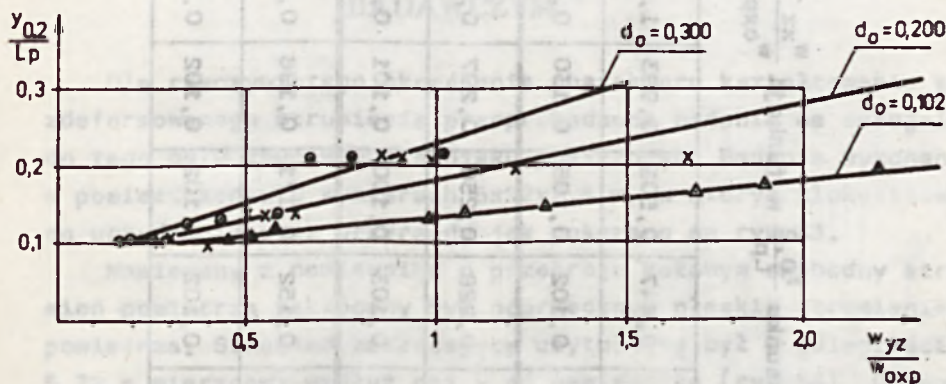
Maksymalne odchylenie obrysu strumienia (punktów o prędkości 0,2 m/s) od osi

$$y_{0,2} = \sqrt{\frac{\ln \frac{0,2}{w_x}}{-\frac{70}{x^2}}} + (x - x_0) \frac{M_{xz}}{M_{exp}} \quad (46)$$

Na podstawie wartości $y_{0,2}$ można określić przesunięcie strumienia i obrys jego nowego ukształtowania. Obliczenia odchylenia obrysu zdeformowanego strumienia dla różnych przypadków przeprowadzono na maszynie cyfrowej ODRA 1204. Program jest w posiadaniu autora.

Wyniki obliczeń dla otworów nawiewnych $d_0 = 0,102$ m; 0,200 m; 0,300 m i strumienia izotermicznego zestawiono w tabelicy 6 i na tej podstawie sporządzono wykres funkcji

$$\frac{y_{0,2}}{L_p} = f\left(\frac{w_{xz}}{w_{exp}}\right) \text{ (rys.31).}$$



Rys.31. Stosunek $\frac{y_{0,2}}{L_p}$ jako funkcja $\frac{w_{xz}}{w_{exp}}$ dla strumienia izotermicznego. Oznaczenia obliczonych punktów dla poszczególnych średnic nawiewnika są następujące: Δ - dla $d_0 = 0,102$, x - dla $d_0 = 0,200$, 0 - dla $d_0 = 0,300$

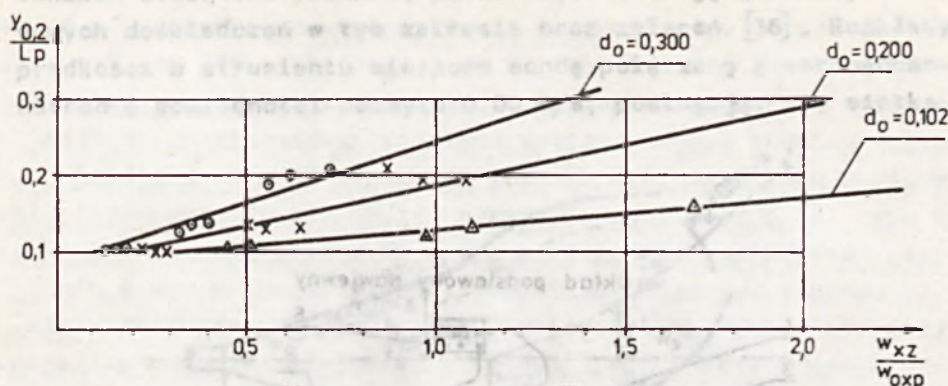
Dla strumienia nieizotermicznego przedstawiono wyniki obliczeń dla $d_0 = 0,102$ m; 0,200 m; 0,300 m (tabela 7).

Przebieg funkcji zilustrowano graficznie na rys.32.

Table 7

Wyniki obliczeń stosunku $\frac{Y_{0,2}}{L_p}$ w funkcji $\frac{W_{xz}}{W_{exp}}$ dla strumienia nieizotermicznego

$d_o = 0,102$	$\frac{w_{xz}}{w_{exp}}$	0,447	0,503	0,983	1,107	1,681	1,892		
	$\frac{Y_{0,2}}{L_p}$	0,102	0,105	0,130	0,136	0,165	0,176		
$d_o = 0,200$	$\frac{w_{xz}}{w_{exp}}$	0,228	0,256	0,297	0,501	0,564	0,653	0,857	0,965
	$\frac{Y_{0,2}}{L_p}$	0,103	0,100	0,101	0,133	0,128	0,128	0,209	0,195
$d_o = 0,300$	$\frac{w_{xz}}{w_{exp}}$	0,152	0,171	0,198	0,334	0,376	0,435	0,571	0,643
	$\frac{Y_{0,2}}{L_p}$	0,102	0,102	0,102	0,127	0,131	0,132	0,192	0,200

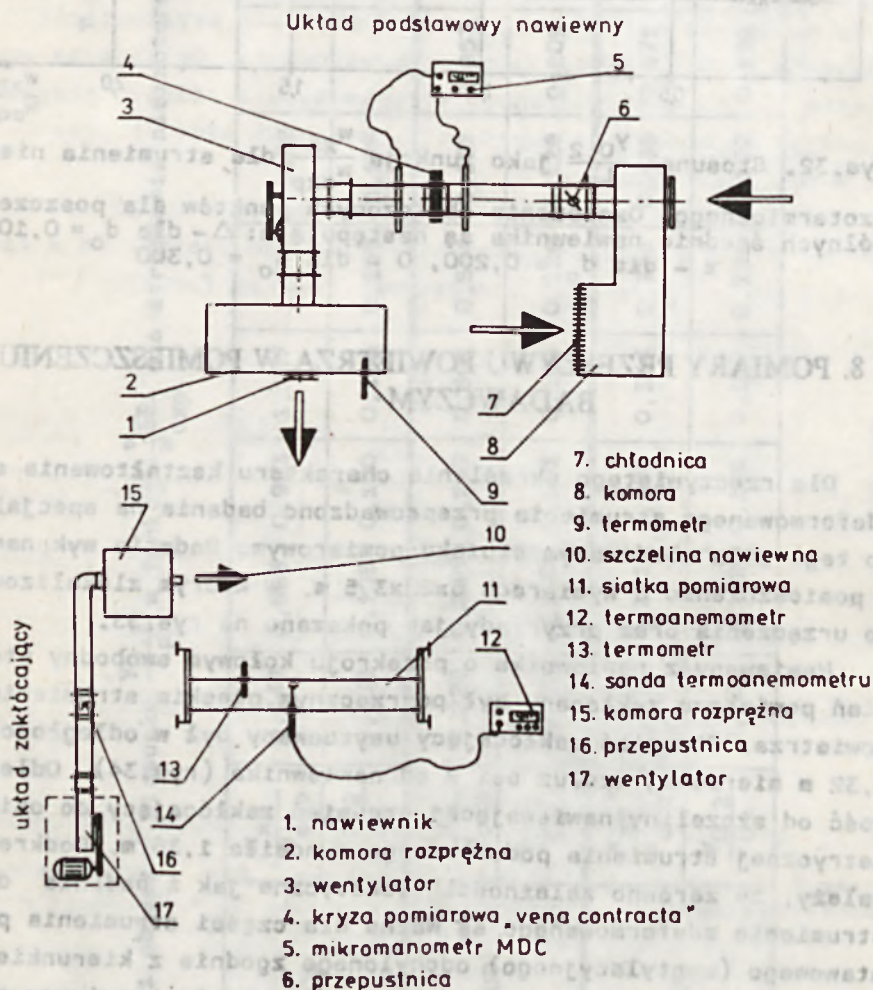


Rys.32. Stosunek $\frac{y_{0.2}}{L_p}$ jako funkcja $\frac{w_{xz}}{w_{exp}}$ dla strumienia nieizotermicznego. Oznaczenia obliczonych punktów dla poszczególnych średnic nawiewnika są następujące: Δ - dla $d_0 = 0,102$, x - dla $d_0 = 0,200$, $\circ$ - dla $d_0 = 0,300$

8. POMIARY PRZEPŁYWU POWIETRZA W POMIESZCZENIU BADAWCZYM

Dla rzeczywistego określenia charakteru kształtowania się zdeformowanego strumienia przeprowadzono badania na specjalnie do tego celu zbudowanym stoisku pomiarowym. Badania wykonano w pomieszczeniu o wymiarach $6 \times 22 \times 3,5$ m, w którym zlokalizowano urządzenia oraz przyrządy jak pokazano na rys.33.

Nawiewany z nawiewnika o przekroju kołowym swobodny strumień powietrza zakłócany był poprzecznym płaskim strumieniem powietrza. Strumień zakłócający usytuowany był w odległości 5,32 m mierzonej wzdłuż osi x od nawiewnika (rys.34). Odległość od szczeliny nawiewającej strumień zakłócający do osi geometrycznej strumienia podstawowego wynosiła 1,36 m. Podkreślić należy, że zarówno zależności teoretyczne jak i badania dla strumienia zdeformowanego są ważne dla części strumienia podstawowego (wentylacyjnego) odchylonego zgodnie z kierunkiem strumienia zakłócającego. Badano strumienie izotermiczne a także strumienie nieizotermiczne. Ochłodzenie strumienia następowało w chłodnicy powierzchniowej przy czym sprężarka i skraplacz umieszczone były w innym pomieszczeniu, aby nie powodowały dodatkowych zysków ciepła w pomieszczeniu pomiarowym. W ba-



Rys.33. Schemat stanowiska pomiarowego

Aby odzwierciedlić takie zakłócenia przyjęto strumień płaski poprzeczny do strumienia podstawowego, wypływający ze szczeliny pionowej o szerokości 10 mm i wysokości 1396 mm. Prędkość wypływu powietrza zmieniano ustawieniem przepustnicy wmontowanej w przewód doprowadzający powietrze zakłócające. Prędkość wypływu powietrza ze szczeliny ustawiano tak, że prędkość ta w przecięciu z osią geometryczną strumienia podstawowego osiągała następujące wartości $w_{xz} = 0,32 \text{ m/s}$, $0,70 \text{ m/s}$, $1,20 \text{ m/s}$.

Badania wykonano dla 24 serii pomiarowych, w tym 9 dla strumienia izotermicznego zakłóconego i 3 dla strumienia niezakłóconego oraz 9 dla strumienia nieizotermicznego zakłóconego i 3 dla strumienia niezakłóconego.

W jednej serii pomiarowej wykonywano pomiary dla 5 - 8 przekrojów poprzecznych strumienia podstawowego. Kolejne przekroje wyznaczano co 0,5 m. Dla określenia rozkładu prędkości w poprzecznym przekroju strumienia podstawowego punkty pomiarowe rozmieszczono według siatki o oczkach 0,2 m. Ilość punktów zależna była od szerokości strumienia i wahała się od 8-14 punktów. Dla jednej serii pomiarowej wykonywano przeciętnie 70 pomiarów prędkości powietrza.

Określenie dokładności pomiarów przeprowadzono w oparciu o wyznaczenie następujących wielkości:

- ilości powietrza wypływającego z nawiewnika $V \text{ m}^3/\text{s}$,
- dokładności odczytu na termoanemometrze dla mierzonych prędkości ($\delta_w = 0,05 \text{ m/s}$).

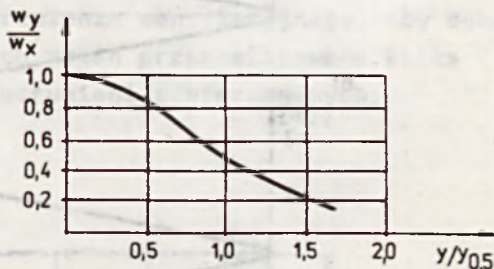
W zakresie wypływu powietrza przez nawiewnik $d_0 = 0,102 \text{ m}$ od $0,0388 \text{ m}^3/\text{s}$ ($w_0 = 4,75 \text{ m/s}$) do $0,0506 \text{ m}^3/\text{s}$ ($w_0 = 6,19 \text{ m/s}$) określano następujące odchyłki dla skrajnych wartości: dla $V = 0,0388 \text{ m}^3/\text{s}$, $\delta'_V = 6,7\%$, dla $V = 0,0506 \text{ m}^3/\text{s}$, $\delta'_V = 3,95\%$ czyli odpowiednio graniczny błąd względny przyjęty jako potrójna wartość średniej kwadratowej odchyłki względnej będzie: $3 \delta'_V = 20,1\%$ oraz $3 \delta'_V = 11,8\%$.

Na podstawie wykonanych pomiarów, przedstawiono w punktach 8.1 oraz 8.2 niniejszej pracy charakterystyczne cechy strumienia formowanych w zmiennych warunkach przepływu.

8.1. STRUMIENIE IZOTERMICZNE

Badania rozpoczęto od zweryfikowania zależności teoretycznych przytoczonych w punkcie 7. Dla oceny wzoru (23) wykonano pomiary sprawdzające dla strumienia swobodnego osiowo-symetrycznego niezakłóconego (podstawowego). Pomiary wykonane dla strumienia wypływającego z prędkością początkową $w_0 = 6,19$ m/s umożliwiły stwierdzenie, że przy końcowej prędkości w osi strumienia $w_k = 0,5$ m/s zasięg wynosi $L_p = 7,40$ m, a strumień przybiera kształt wydłużonej kropli. Dla podanych wyżej warunków wypływu strumienia obliczono zasięg strumienia z wzoru (23). Obliczony zasięg strumienia L_p wynosi 7,57 m. Błąd między wartością zasięgu obliczoną z wzoru (23) a pomierzoną w warunkach rzeczywistych wynosi 2,3%. Przy takiej wartości błędów oceniono, że wzór (23) jest wystarczająco dokładny dla określenia rozkładu prędkości w osi strumienia swobodnego osiowo-symetrycznego.

W analizie rozkładu prędkości w strumieniu, istotne znaczenie ma także wzór (15) wyznaczający prędkości w poprzecznym przekroju strumienia. Dla weryfikacji tego wzoru na rys.35 podano krzywą wyznaczoną punktami pomiarowymi dla przekroju poprzecznego strumienia w odległości $x = 5,5$ m od wylotu

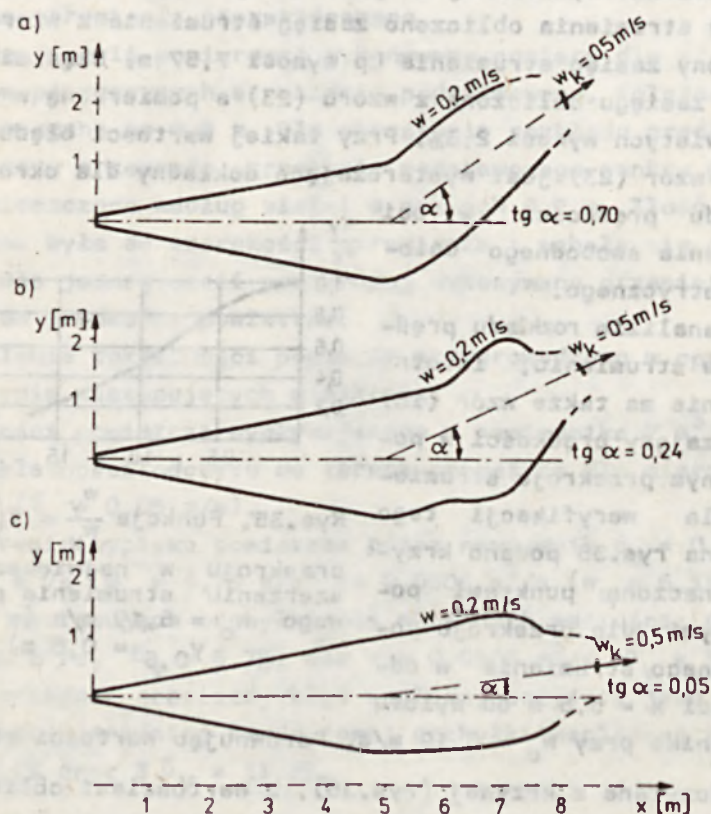


Rys.35. Funkcja $\frac{w_y}{w_x} = f\left(\frac{y}{y_{0,5}}\right)$ dla przekroju w największym rozszerzeniu strumienia podstawowego $w_0 = 6,19$ m/s ($x = 5,5$ m, $y_{0,5} = 0,6$ m)

nawiewnika przy $w_0 = 6,19$ m/s. Porównując wartości stosunku $\frac{w_y}{w_x}$ odczytane z krzywej (rys.35), z wartościami obliczonymi z wzoru (15) stwierdzono, że błąd nie przekracza 7,6% (dla $y/y_{0,5} = 1,4$). Przy takiej wielkości błędów można uznać, że wzór (15) jest wystarczająco dokładny i może być stosowany w praktycznych obliczeniach.

Pomierzono także rozkład prędkości w strumieniu płaskim wypływającym ze szczeliny. Strumień ten w przyjętym modelu ba-

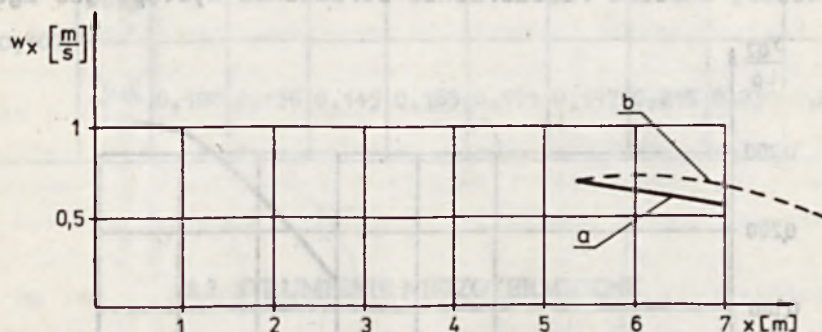
dawczym stosowany był jako strumień zakłócający. Dla określenia rozkładu prędkości wzdłuż osi strumienia płaskiego stosowano wzór (8). Przy prędkości wypływu ze szczeliny 1,5 m/s zmierzona prędkość w odległości 1,36 m (tj. w miejscu przecięcia z osią geometryczną strumienia podstawowego) wynosiła 0,32 m/s. Stosując wzór (8) (przy tej samej prędkości wypływu ze szczeliny) obliczona prędkość w przecięciu z osią geometryczną strumienia podstawowego jest równa 0,339 m/s. Błąd między wartością obliczoną i pomierzoną wynosi 5,6%. Taka wartość błędu zapewnia wystarczającą dokładność stosowanego wzoru (8).



Rys.36. Deformacja strumienia podstawowego ($w_0 = 6,19$ m/s) przy zakłóceniu w odległości 5,32 m od nawiewnika: a - przy $w_{xz} = 1,20$ m/s, b - przy $w_{xz} = 0,70$ m/s, c - przy $w_{xz} = 0,32$ m/s

Dla zweryfikowania opracowanej przez autora metody obliczeniowej przedstawionej w rozdziale 7.1 wykonano pomiary dla

strumieni zdeformowanych. Ważnym parametrem określającym wielkość odchylenia strumienia jako skutek występującego zakłócenia jest kąt α między osią geometryczną strumienia podstawowego a osią rzeczywistą strumienia odchylonego. Na rys.36 przedstawiono obraz graficzny odchylonego strumienia wypływającego z nawiewnika z prędkością $w_0 = 6,19$ m/s podając jednocześnie wartości $\tan \alpha$ jako ilustrację odchylenia dla trzech prędkości zakłócających. Porównanie wyników pomiarów z obliczeniami uzyskanymi w oparciu o wzory zawarte w rozdziale 7.1 pozwala określić następujące wartości błędów dla poszczególnych prędkości zakłócających: $w_{xz} = 1,20$ m/s (rys.36a) - błąd 7,1%; $w_{xz} = 0,70$ m/s (rys.36b) - błąd 8,3%; $w_{xz} = 0,32$ m/s (rys.36c) - błąd 8,0%. Największa wartość błędów wynosi 8,3%, a więc można przyjąć, że metoda obliczeniowa przedstawiona w rozdziale 7.1 pozwala uzyskiwać poprawne wyniki obliczeń. Wpływ zakłócenia zlokalizowanego w pobliżu strefy pracy powoduje znaczne zmiany w kształtowaniu się strumienia wentylacyjnego. Aby dokładniej rozpoznać kierunki tych zmian przeanalizowano kilka przykładowych charakterystyk strumieni zdeformowanych.

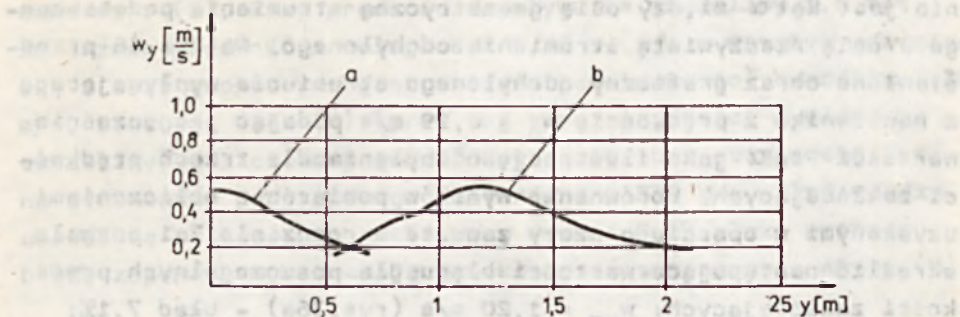


Rys.37. Rozkład prędkości w_x wzdłuż strumienia (zakłócenie w odległości 5,32 m): a - dla osi geometrycznej, b - dla osi rzeczywistej

Na rys.37 (krzywa b) zasięg strumienia zakłóconego jest w osi rzeczywistej wydłużony zarówno w stosunku do osi geometrycznej, jak i w stosunku do strumienia podstawowego. Taki stan sugeruje, że strumień zakłócający przekazuje część energii strumieniowi podstawowemu.

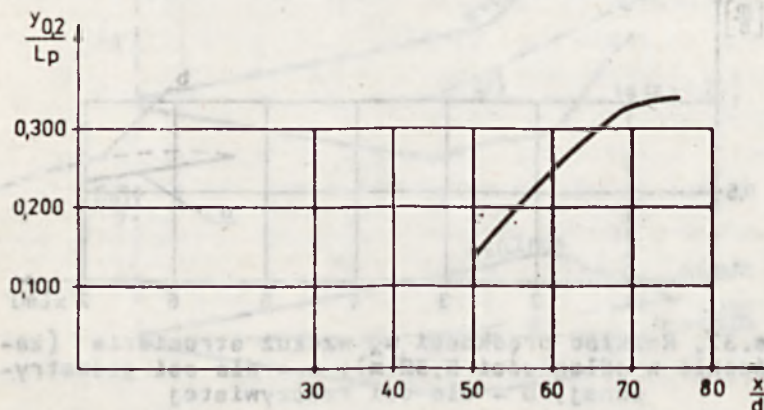
Porównując na rys.38 krzywe a i b można stwierdzić, że pokazany za pomocą krzywej b profil prędkości strumienia zakłó-

conego ma zupełnie inny charakter i przebieg niż profil dla strumienia podstawowego - krzywa a.



Rys.38. Profil rozkładu prędkości w przekroju poprzecznym strumienia w odległości 7 m, tj. w pobliżu wejścia do strefy pracy ($w_0 = 6,19$ m/s, $w_{xz} = 1,20$ m/s)

Maksymalna prędkość w strumieniu zakłóconym jest wyższa i występuje w odległości 1,18 m od osi geometrycznej strumienia, a sam profil rozkładu prędkości ilustruje znaczne rozszerzenie strumienia i średnie podwyższenie występujących w nim prędkości. Znaczne rozszerzenie strumienia występujące zgod-



Rys.39. Odchylenie linii obrysu strumienia zdeformowanego w odniesieniu do zasięgu strumienia podstawowego w funkcji odległości od nawiewnika ($w_0 = 6,19$ m/s, $w_{xz} = 1,20$ m/s)

nie z kierunkiem zakłócenia określa rys.39. Funkcja $\frac{y_{0,2}}{L_p} = f\left(\frac{x}{d}\right)$ ma charakter krzywej stromej, jednak w swej końcowej

części o zmniejszonym nachyleniu. To zakrzywienie określa, że strumień po odchyleniu strumieniem zakłócającym, w pobliżu strefy zamierania zaczyna mieć tendencję do zmniejszania kąta odchylenia w stosunku do osi geometrycznej. Podstawowa część odkształcenia jest tak znaczna, że wymieniona wyżej tendencja końcowej części strumienia do przesuwania się pod zmniejszonym kątem nie zmienia w znaczącym zakresie generalnej deformacji strumienia. Wyniki pomiarów dla określenia odchylenia strumienia jako $\frac{y_{0,2}}{L_p}$ w zależności od stosunku $\frac{w_{xz}}{w_{exp}}$ zestawiono w tablicy 8.

T a b l i c a 8

Na podstawie wyników pomiarów zestawiono wartości

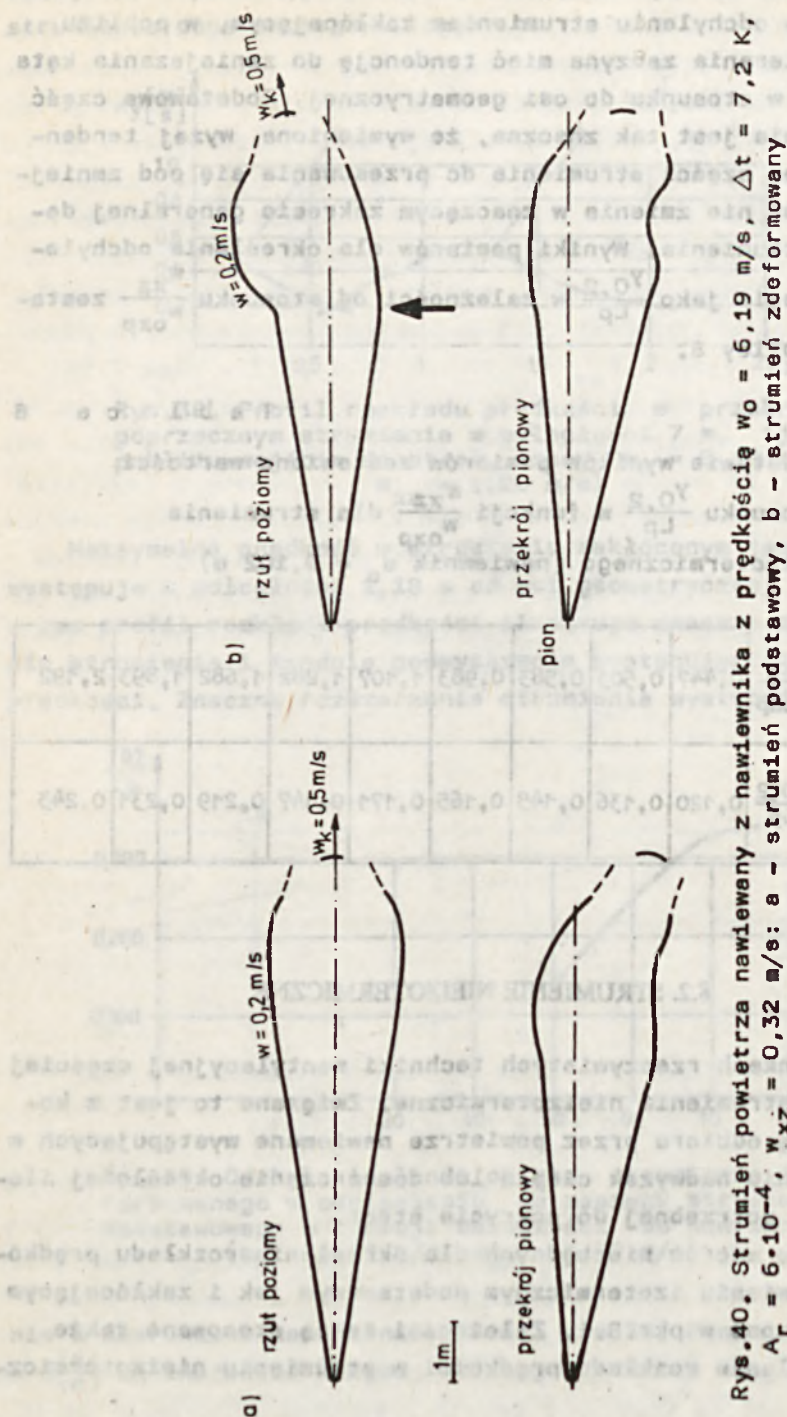
stosunku $\frac{y_{0,2}}{L_p}$ w funkcji $\frac{w_{xz}}{w_{exp}}$ dla strumienia izotermicznego (nawiewnik $d_0 = 0,102$ m)

$d_0 = 0,102$	$\frac{w_{xz}}{w_{exp}}$	0,447	0,503	0,583	0,983	1,107	1,282	1,682	1,893	2,192
	$\frac{y_{0,2}}{L_p}$	0,120	0,136	0,145	0,165	0,171	0,147	0,219	0,231	0,243

8.2. STRUMIENIE NIEIZOTERMICZNE

W warunkach rzeczywistych techniki wentylacyjnej częściej występują strumienie nieizotermiczne. Związane to jest z koniecznością odbioru przez powietrze nawiewane występujących w pomieszczeniu nadwyżek ciepła lub dostarczanie określonej ilości ciepła potrzebnej do pokrycia strat.

Analizę wzorów niezbędnych dla określenia rozkładu prędkości w strumieniu izotermicznym podstawowym jak i zakłócającym przeprowadzono w pkt.8.1. Zależności te są stosowane także przy określaniu rozkładu prędkości w strumieniu nieizotermicznym.



Rys. 40. Strumień powietrza nawiewany z nawiewnika z prędkością $w_0 = 6.19 \text{ m/s}$, $\Delta t = 7.2 \text{ K}$, $A_f = 6 \cdot 10^{-4}$, $w_{xz} = 0.32 \text{ m/s}$: a - strumień podstawowy, b - strumień zdeformowany

W przeprowadzonych badaniach nawiewano swobodny, osiowo-symetryczny strumień o temperaturze niższej od temperatury otoczenia o około 6-8 K.

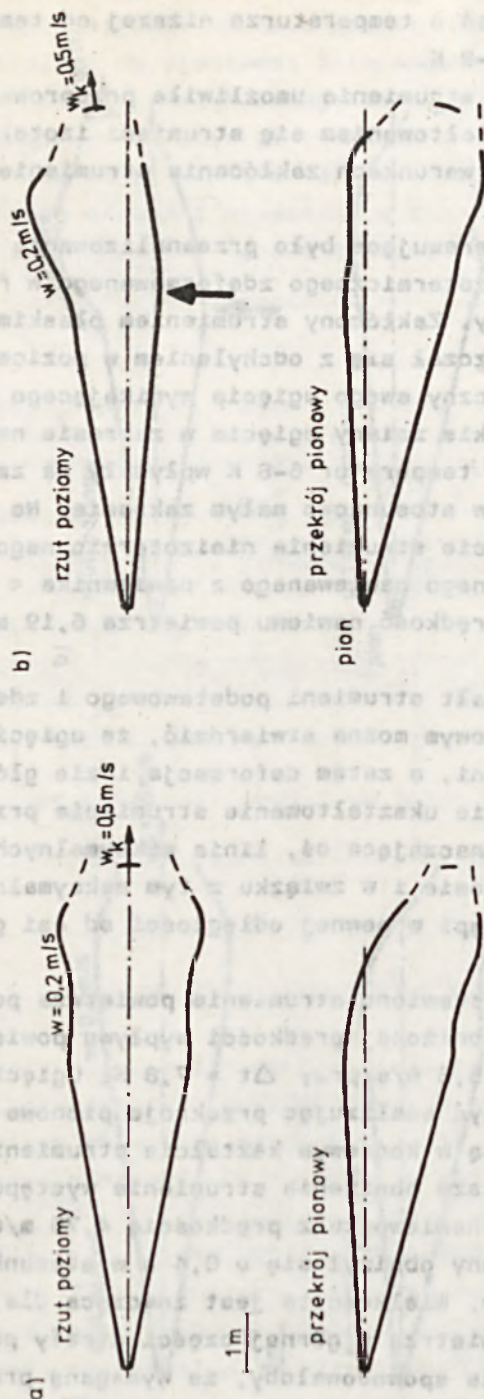
Obserwacja tego strumienia umożliwiła przeprowadzenie porównania między kształtowaniem się strumieni izotermicznych i nieizotermicznych w warunkach zakłócenia strumieniem poprzecznym płaskim.

Szczególnie interesujące było przeanalizowanie rozwijania się strumienia nieizotermicznego zdeformowanego w rejonie wejścia do strefy pracy. Zakłócony strumieniem płaskim strumień podstawowy przemieszczał się z odchyleniem w poziomie nie zmieniając w sposób znaczny swego ugięcia wynikającego z różnicy temperatur. Niewielkie zmiany ugięcia w zakresie najczęściej występującej zmiany temperatur 6-8 K wpływały na zmianę zasięgu strumienia, ale w stosunkowo małym zakresie. Na rys.40 zamieszczono rozwinięcie strumienia nieizotermicznego swobodnego osiowo-symetrycznego nawiewanego z nawiewnika o przekroju kołowym $\varnothing 102$ mm, prędkość nawiewu powietrza 6,19 m/s, $\Delta t = 7,2$ K.

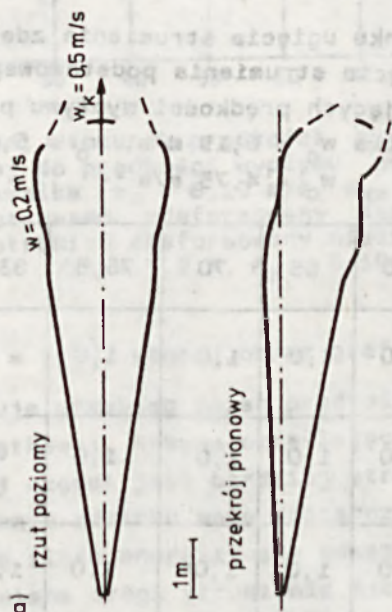
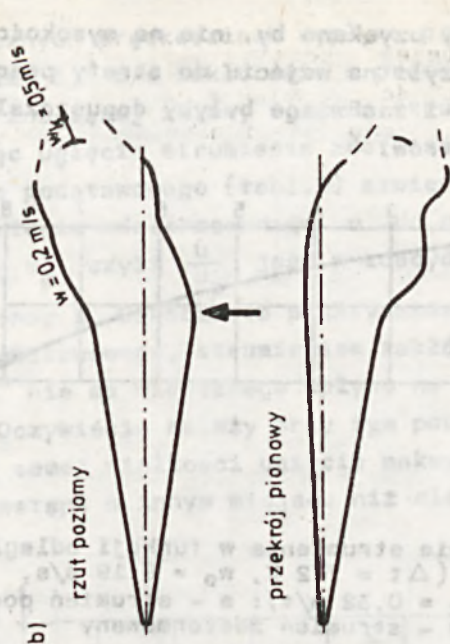
Porównując kształt strumieni podstawowego i zdeformowanego w przekroju pionowym można stwierdzić, że ugięcie strumienia niewiele się różni, a zatem deformacja idzie głównie w kierunku poziomym. Takie ukształtowanie strumienia przemieszcza oś rzeczywistą. Wyznaczająca oś, linia maksymalnych prędkości przesuwają się w poziomie i w związku z tym maksymalne obniżenie strumienia nastąpi w pewnej odległości od osi geometrycznej.

Na rys.41 przedstawiono strumienie powietrza podstawowy i zdeformowany, dla obniżonej prędkości wypływu powietrza z nawiewnika, tj. $w_0 = 5,5$ m/s przy $\Delta t = 7,8$ K. Ugięcie strumienia jak można zauważyć analizując przekroje pionowe jest podobne, pewne różnice są w końcowym kształcie strumienia.

Nieco wyraźniejsze obniżenie strumienia występuje przy nawiewie powietrza z nawiewnika z prędkością 4,75 m/s (rys.42). Strumień zdeformowany obniżył się o 0,4 m w stosunku do strumienia podstawowego. Wielkość ta jest znacząca dla ukształtowania przepływu powietrza w górnej części strefy pracy. Takie obniżenie strumienia spowodowałoby, że wymaganą prędkość wej-

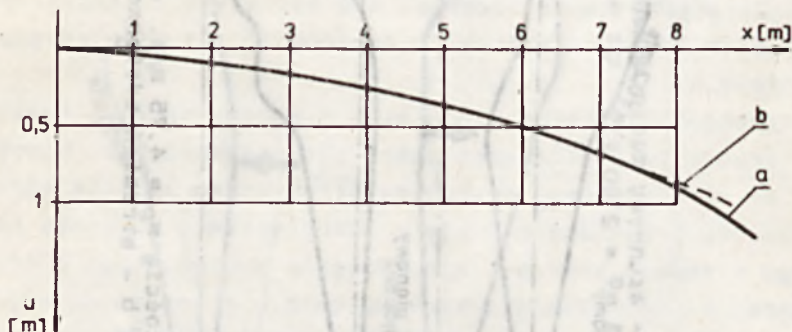


Rys.41. Strumień powietrza nawiewany z nawiewnika z prędkością $w_0 = 5,50 \text{ m/s}$, $\Delta t = 7,8 \text{ K}$, $A_r = 8,10-4$, $w_{xz} = 0,32 \text{ m/s}$; a - strumień podstawowy, b - strumień zdeformowany



Rys.42. Strumień powietrza nawiewany z nawiewnika z prędkością $w_0 = 4.75 \text{ m/s}$, $\Delta t = 7.0 \text{ K}$, $A_r = 1.10-3$, $w_{xz} = 0.32 \text{ m/s}$: a - strumień podstawowy, b - strumień zdeformowany

ścia do strefy pracy uzyskano by, nie na wysokości 2 m, a na wysokości 1,60 m. Czyli na wejściu do strefy pracy prędkość byłaby przekroczona i zachwiane byłyby dopuszczalne wartości podstawowych parametrów.



Rys.43. Ugięcie strumienia w funkcji odległości od nawiewnika x ($\Delta t = 7,2$ K, $w_0 = 6,19$ m/s, $A_r = 6 \cdot 10^{-4}$, $w_{xz} = 0,32$ m/s): a - strumień podstawowy, b - strumień zdeformowany

Interesujące jest prześledzenie zmian ugięcia strumienia jako reakcji na występujące zakłócenia (rys.43).

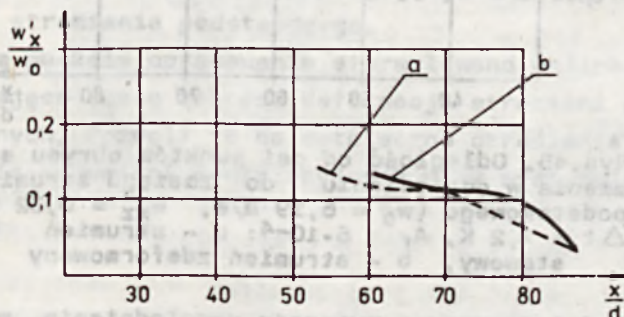
T a b l i c a 9

Wartości stosunku ugięcia strumienia zdeformowanego u do ugięcia strumienia podstawowego u_p , dla następujących prędkości wypływu powietrza z nawiewnika $w_0 = 6,19$ m/s, $w_0 = 5,5$ m/s, $w_0 = 4,75$ m/s

$\frac{x}{d}$		60	65	70	76,5	83	85	87
$\frac{u}{u_p}$	$w_0 = 6,19$ m/s	1,0	1,0	1,0	1,0			0,83
	$w_0 = 5,5$ m/s	1,0	1,0	1,0	1,0		1,0	
	$w_0 = 4,75$ m/s	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0		

Przy znacznych prędkościach wypływu powietrza z nawiewnika, tj. powyżej 5,5 m/s zakłócenie o prędkości $w_{xz} = 0,32$ m/s nie powoduje znaczącej zmiany ugięcia strumienia.

Analizując ugięcie strumienia zdeformowanego w stosunku do strumienia podstawowego (tabl.9) stwierdzono, że stosunek ugięcia strumienia zdeformowanego u do ugięcia strumienia podstawowego u_p czyli $\frac{u}{u_p}$ jest w zdecydowanej większości przypadków równy 1. Oznacza to praktycznie, że zakłócenie strumienia podstawowego, strumieniem zakłócającym skierowanym pod kątem 90° nie ma widocznego wpływu na wielkość ugięcia strumienia. Oczywiście należy przy tym pamiętać, że przy zachowaniu tej samej wielkości ugięcie maksymalne, obniżenie strumienia nastąpi w innym miejscu niż dla strumienia podstawowego.

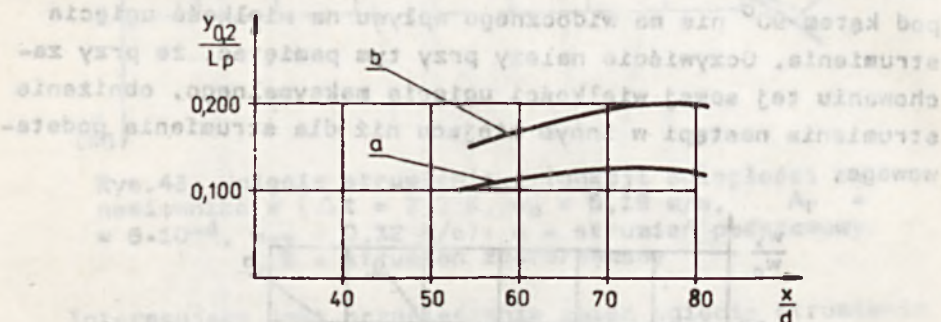


Rys.44. Stosunek prędkości w osi rzeczywistej do prędkości wypływu powietrza z nawiewnika ($w_0 = 6,19$ m/s, $w_{xz} = 0,32$ m/s):
 a - strumień zdeformowany izotermiczny,
 b - strumień zdeformowany nieizotermiczny
 $\Delta t = 7,2$ K, $A_r = 6 \cdot 10^{-4}$

Funkcja $\frac{w'_x}{w_0} = f\left(\frac{x}{d}\right)$, której obraz graficzny pokazano na rys.

44 charakteryzuje przebieg zmian prędkości w odniesieniu do prędkości początkowej. Krzywa określająca strumień zdeformowany w końcowej części jest bardziej stroma co oznacza, że zakłócenie na pewnym odcinku może dostarczyć strumieniowi podstawowemu pewną ilość energii, ale odkształcenie strumienia powoduje, że zmiana drogi strumienia nie pozwala na zbyt duże zmiany jego zasięgu.

Jedną z podstawowych wielkości określających wielkość deformacji strumienia jest odchylenie jego skrajnej krawędzi w stosunku do układu strumienia podstawowego. Jak wynika z rys. 45 krzywa "b" określająca wielkość stosunku $\frac{y_{0,2}}{L_p}$ dla strumienia zdeformowanego, jest położona wyżej, niż krzywa "a" dla strumienia podstawowego. Różnice wartości $\frac{y_{0,2}}{L_p}$ dla krzywych b i a wahają się od 0,050 dla zasięgu strumienia $x = 5,5$ m do maksymalnej wartości 0,070 dla zasięgu $x = 7,8$ m. Są to jak



Rys.45. Odległość od osi punktów obrysu strumienia w odniesieniu do zasięgu strumienia podstawowego ($w_0 = 6,19$ m/s, $w_{xz} = 0,32$ m/s, $\Delta t = 7,2$ K, $A_r = 6 \cdot 10^{-4}$: a - strumień podstawowy, b - strumień zdeformowany)

widać wielkości znaczne i wymagają uwzględnienia w analizie rozdziału powietrza.

T a b l i c a 10

Na podstawie wyników pomiarów zestawiono wartości stosunku $\frac{y_{0,2}}{L_p}$ w funkcji $\frac{w_{xz}}{w_{exp}}$ dla strumienia nieizotermicznego (nawiewnik $d_0 = 0,102$ m)

$d_0 = 0,102$	$\frac{w_{xz}}{w_{exp}}$	0,447	0,983	1,107	1,681	1,892
	$\frac{y_{0,2}}{L_p}$	0,111	0,122	0,134	0,164	0,189

Wyniki pomiarów dla określenia odchylenia strumienia $\frac{y_{0,2}}{L_p}$, w zależności od stosunku $\frac{w_{xz}}{w_{exp}}$ zestawiono w tablicy 10.

9. WPŁYW STRUMIENI ZAKŁÓCAJĄCYCH NA ZASIĘG I KSZTAŁT STRUMIENI WENTYLACYJNYCH W STREFIE PRACY

Strumienie zakłócające mogą być skierowane z różnych kierunków w stosunku do strumienia podstawowego. Mogą to być strumienie współbieżne, przeciwbieżne, a także pod różnymi kątami w stosunku do strumienia podstawowego.

Skoncentrowano się na analizowaniu skutków zakłóceń wywołanych strumieniem płaskim rozwijającym się poprzecznie w stosunku do strumienia podstawowego.

W tym punkcie opracowania sformułowano ogólne zależności umożliwiające ocenę zakresu deformacji strumieni w warunkach praktycznych. Pozwoli to na ostateczne określenie warunków rozwijania strumieni wentylacyjnych przy występujących zakłóceniach.

9.1. ZAKRES DEFORMACJI STRUMIENIA IZOTERMICZNEGO

Przy występowaniu zakłóceń o różnej intensywności strumienia charakterystyczną wielkością uogólnioną jest iloraz $\frac{w_{xz}}{w_{exp}}$. Stosunek prędkości strumienia zakłócającego w przecięciu z osią geometryczną strumienia podstawowego do prędkości powietrza w strumieniu podstawowym w miejscu przecięcia z osią geometryczną strumienia zakłócającego, daje możliwości porównawcze przy różnych strumieniach podstawowych. Jednym z bardziej interesujących problemów ważnych dla zastosowań praktycznych jest określenie maksymalnego odchylenia obrysu strumienia w stosunku do jego kształtu, kiedy zakłócenie nie występuje. Zagadnienie jest ważne nie tylko ze względu na deformację strumienia i zmianę jego pola oddziaływania, ale także w związku z ewentualnym zakłóceniem strumieni sąsiadujących. Na rys.31

wielkość odchylenia krawędzi strumienia $y_{0,2}$ odniesiono do zasięgu strumienia podstawowego L_p czyli strumienia niezakłóconego. Funkcję $\frac{y_{0,2}}{L_p} = f\left(\frac{w_{xz}}{w_{exp}}\right)$ wg metody obliczeniowej można ująć zależnością następującą: dla $d_0 = 0,102 \text{ m}$; $0,200 \text{ m}$; $0,300 \text{ m}$ wzór uogólniony przyjmie postać

$$\frac{y_{0,2}}{L_p} = C_L d_0 \frac{w_{xz}}{w_{exp}} + 0,08. \quad (47)$$

Wartości współczynnika C_L dla następujących zasięgów strumienia wentylacyjnego wynoszą dla

0,7 L_p współczynnik $C_L = 0,50$

0,8 L_p współczynnik $C_L = 0,65$

0,9 L_p współczynnik $C_L = 0,80$.

Wzór (47) zweryfikowano ustalając wielkości odchyłki między wartościami uzyskanymi z wzoru (47) i wartością $\frac{y_{0,2}}{L_p}$ uzyskaną z pomiarów. Przeprowadzenie badań dla nawiewnika $d_0 = 0,102 \text{ m}$ jest wystarczające dla sprawdzenia przyjętej metody.

Przebieg zmienności funkcji przeanalizowano w zakresie stosunku $\frac{w_{xz}}{w_{exp}}$ od $0,4 \div 2$ dla zasięgu strumienia wentylacyjnego $0,8 L_p$. Błąd dla tego zakresu zmieniał się od 10,1% dla $\frac{w_{xz}}{w_{exp}} = 0,447$ do 9,4% dla $\frac{w_{xz}}{w_{exp}} = 2,192$ przy zachowaniu tego samego charakteru obydwu funkcji.

Jak zaobserwowano, zakłócenie strumienia powietrza wpływającego z nawiewnika, strumieniem zakłócającym usytuowanym pod kątem prostym powoduje odchylenie strumienia oraz niewielką zmianę jego zasięgu.

9.2. ZAKRES DEFORMACJI STRUMIENIA NIEIZOTERMICZNEGO

Analizując zachowanie badanych strumieni nieizotermicznych, podobnie jak dla strumieni izotermicznych, określono zależności między odchyleniem krawędzi strumienia a stosunkiem prędko-

ści strumienia zakłócającego i podstawowego. Dla strumieni nieizotermicznych funkcja $\frac{Y_{0,2}}{L_p} = f\left(\frac{w_{xz}}{w_{exp}}\right)$ przebiega podobnie jak dla strumieni izotermicznych.

Uogólniony wzór (47) jest ważny dla obliczania strumienia nieizotermicznego.

Zależność tę sprawdzono dla zakresu wartości stosunku $\frac{w_{xz}}{w_{exp}}$ od 0,4 do 2,0. Jest to zakres najczęściej występujący w warunkach rzeczywistych. Stosunek $\frac{w_{xz}}{w_{exp}}$ nie może przybierać zbyt dużych wartości, bo oznaczałoby to, że strumień zakłócający jest znacznie większy od strumienia podstawowego. W praktyce, w przypadku występowania silnego strumienia zakłócającego powinno być podjęte przeciwdziałanie w kierunku jego ograniczenia. Jeżeli wpływ strumienia następuje z nieszczelności obudowy maszyny czy dużych nieszczelności przegród budowlanych, to tak duże nieszczelności muszą być zlikwidowane. Powyższa zależność ma zastosowanie do przeciętnie występujących warunków.

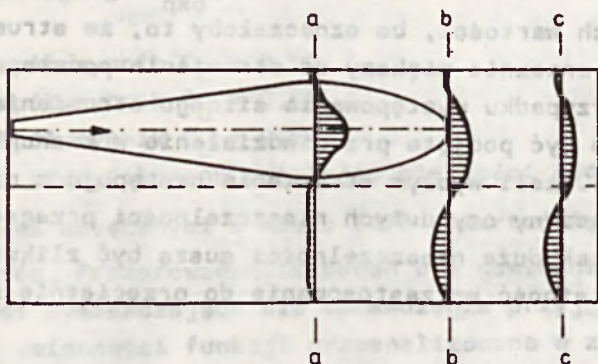
Występujący dla zakresu $\frac{w_{xz}}{w_{exp}}$ od 0,4 do 2,0 błąd między *wartością* funkcją określoną metodą obliczeniową a *wartością* funkcją ustaloną empirycznie zmieniał się od 1,8% dla $\frac{w_{xz}}{w_{exp}} = 0,447$ do 6,9% dla $\frac{w_{xz}}{w_{exp}} = 1,892$ przy zachowaniu podobnego charakteru obydwu funkcji.

Przy wzroście prędkości strumienia zakłócającego wzrasta także zasięg strumienia zdeformowanego jako wynik przekazywania energii strumienia zakłócającego strumieniowi podstawowemu. Wzrost ten nie jest duży, ale przy wysokich wymaganiach odnośnie stabilności parametrów mikroklimatu może mieć pewien wpływ na kształtowanie rozdziału powietrza.

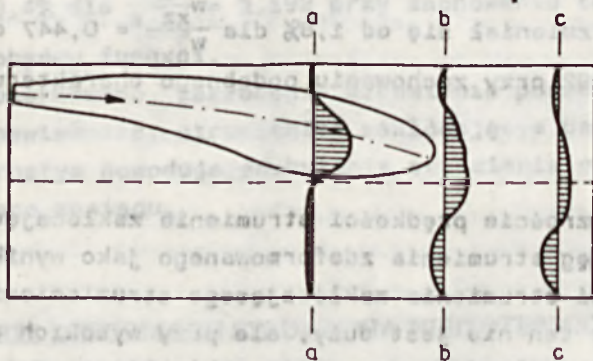
10. CZYNNIKI WARUNKUJĄCE STABILIZACJĘ PRZEPŁYWU POWIETRZA W STREFIE PRACY

W analizie rozkładu strumieni powietrza w pomieszczeniu, istotnym elementem jest określenie wypełnienia strumieniami rejonu wejścia w strefę pracy.

W miejscu największego rozszerzenia strumieni powinny one konturami zbliżyć się, jednak nie zachodzić na siebie. Rozpatrując ten przekrój pomieszczenia można określić pole przekroju przepływu strumieni i dla określenia ilości powietrza także prędkość średnią. Przebieg rozkładu prędkości w końcowej części pomieszczenia zilustrowano na rys.46 dla warunków izo-



Rys.46. Rozkład prędkości w końcowej części pomieszczenia dla strumienia izotermicznego



Rys.47. Rozkład prędkości w końcowej części pomieszczenia dla strumienia nieizotermicznego

termicznych oraz na rys.47 dla warunków nieizotermicznych. Przekrój a-a odnosi się do największego rozszerzenia strumienia, b-b dla końcowej części strumienia, c-c dla przekroju przed przegrodą, na której następuje odbicie strumienia nawiewanych.

Jak wynika z rys.46 i 47 prawidłowo zaprojektowany strumień po odbiciu od przegrody powoduje przepływ powietrza powrotnego przez strefę pracy i strefę ponad strumieniem przy założeniu, że w strefie pracy nie występują konwekcyjne lub inne zakłócające strumienie. Podobnie zorganizowany przepływ następuje także dla strumienia nieizotermicznego.

W przypadku jednak zakłócenia strumienia nawiewanego i spowodowanie częściowego nałożenia się strumieni, może nastąpić miejscowe wektorowe sumowanie prędkości składowych i wypadkowa prędkość będzie znacznie większa niż dopuszczaliby to zasady projektowania.

Jak zasygnalizowano w pkt.7 ilość ruchu w dowolnym przekroju poprzecznym o ile tylko siły dynamiczne w tym przekroju przeważają będzie

$$M_x = \frac{\pi \rho_0 w_x^2}{2p}.$$

Jeżeli zmienią się warunki przepływu strumienia powstaje zagadnienie jego porównywalności jako warunku oceny skutków występujących zmian.

Oznaczając pęd strumienia podstawowego M_{x1} a strumienia po zmianie warunków jego przepływu M_{x2} i dokonując ich porównania będzie

$$\frac{M_{x1}}{M_{x2}} = \frac{\frac{\pi \rho_1 w_{x1}^2}{2p}}{\frac{\pi \rho_2 w_{x2}^2}{2p}} = \frac{\rho_1 w_{x1}^2}{\rho_2 w_{x2}^2}.$$

czyli

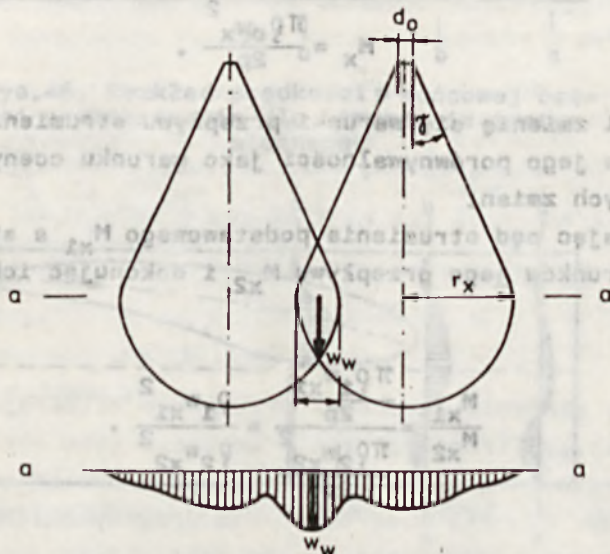
$$\frac{M_{x1}}{M_{x2}} = \frac{\rho_1 w_{x1}^2}{\rho_2 w_{x2}^2}. \quad (48)$$

W warunkach praktycznych najłatwiej ocenę ruchu strumienia można dokonać przez pomiar prędkości. Jak wynika to z zależności (48) prędkość może być wskaźnikiem oceny ilości ruchu w poprzecznym przekroju strumienia.

Dla dokonania oceny przepływu powietrza w przekroju strumienia posłużono się średnią prędkością w przekroju określoną przez A b r a m o w i c z a [37] jako dającą możliwość zbilansowania przepływów powietrza w rozpatrywanej strefie pomieszczenia. Średnia prędkość w płaszczyźnie dla strumienia swobodnego osiowo-symetrycznego będzie

$$\frac{w_{\text{śr}}}{w_0} = \frac{0,095}{\frac{a_w x}{d_0} + 0,145} \quad (49)$$

przy czym dla wylotu z przewodu o przekroju kołowym $a_w = 0,08$. Posługując się wartością średniej prędkości dla zbilansowania przepływów powietrza w rozpatrywanym przekroju należy, jednak pamiętać, że o efektywności oddziaływania strumienia w pomieszczeniu decyduje prędkość maksymalna.



Rys.48. Strumienie równoległe wzajemnie się przenikające

Rozpatrując przypadek z dwoma strumieniami nawiewanymi równoległe i w pewnym zakresie zachodzącymi na siebie, istot-

ny jest przebieg zależności wzrostu prędkości w miejscu wzajemnego zachodzenia strumieni a głębokością ich wnikania (rys. 48). Rozkład prędkości w przekroju a-a ilustruje znaczny wzrost prędkości w obszarze wzajemnego przenikania strumieni.

Wzrost prędkości wypadkowej spowoduje wzrost zasięgu strumienia i zmianę warunków wejścia powietrza do strefy pracy. Jak opisano powyżej, zachodzenie strumieni może być spowodowane odchyleniem strumienia podstawowego przez zakłócający strumień boczny. Jak wykazano w poprzednio prowadzonych rozważaniach odchylony strumieniem zakłócającym, strumień podstawowy przemieszcza się pod kątem α , jednak w końcowej części strumienia przepływ powietrza ma tendencję przesuwania się bliskiego równoległemu do kierunku zasadniczego. Przy takiej właściwości strumienia można uznać za możliwe porównywanie dwóch równoległych strumieni zachodzących na siebie z dwoma strumieniami równoległymi, gdzie jeden z nich zakłócony jest strumieniem poprzecznym. Strumień podstawowy będzie zmieniał swój zasięg na skutek deformacji oraz w zależności od charakteru i stopnia głębokości wnikania w strumień sąsiedni.

W przypadku rozdziału powietrza w pomieszczeniu, gdzie strumienie poziome nawiewane są równoległe, istotne jest zachowanie między nimi odpowiedniej odległości.

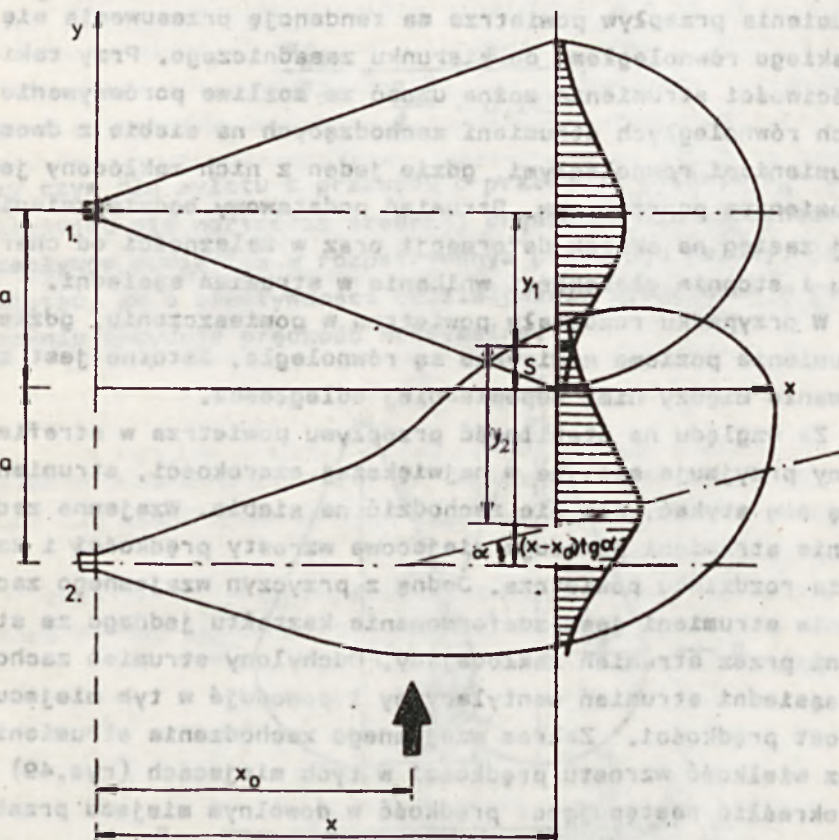
Ze względu na stabilność przepływu powietrza w strefie pracy przyjmuje się, że w największej szerokości, strumienie mogą się stykać, ale nie zachodzić na siebie. Wzajemne zachodzenie strumieni powoduje miejscowe wzrosty prędkości i zakłócenia rozdziału powietrza. Jedną z przyczyn wzajemnego zachodzenia strumieni jest zdeformowanie kształtu jednego ze strumieni przez strumień zakłócający. Odchylony strumień zachodzi na sąsiedni strumień wentylacyjny i powoduje w tym miejscu wzrost prędkości. Zakres wzajemnego zachodzenia strumieni, oraz wielkość wzrostu prędkości w tych miejscach (rys. 49) można określić następująco: prędkość w dowolnym miejscu przekroju strumienia w odległości, x

$$w_{y1} = w_x e^{-py_1^2}$$

$$w_{y2} = w_x e^{-py_2^2}$$

gdzie

- w_{y1}, w_{y2} - prędkość w dowolnym miejscu w przekroju strumienia podstawowego oraz zakłóconego,
- a - połowa odległości między nawiewnikami,
- y_1 - odległość od osi strumienia 1, w której występuje prędkość w_{y1} ,
- y_2 - odległość od osi strumienia 2, w której występuje prędkość w_{y2} ,
- w'_x - prędkość w osi strumienia zakłóconego w odległości x .



Rys.49. Zakłócony strumień odchylony w kierunku strumienia sąsiedniego

Dla miejsca przecięcia krzywych określających rozkład prędkości w rozpatrywanych strumieniach w odległości x bę-

dzie prędkość o tej samej wartości, ale jej wektor usytuowany będzie w odległości s od osi x wg oznaczenia na rys.49

$$w_{y1} = w_{y2}.$$

$$w_x e^{-py_1^2} = w'_x e^{-py_2^2},$$

$$e^{-p(y_1^2 - y_2^2)} = \frac{w'_x}{w_x},$$

$$\ln \frac{w'_x}{w_x} = -p(y_1^2 - y_2^2),$$

przyjmując

$$y_1 = a - s,$$

$$y_2 = a - (x - x_0) \operatorname{tg} \alpha + s,$$

$$\ln \frac{w'_x}{w_x} = -p \left((a-s)^2 - \left[a - (x-x_0) \operatorname{tg} \alpha \right] + s \right)^2,$$

po przekształceniach można wyznaczyć s

$$s = \frac{\ln \frac{w'_x}{w_x} + 2ap(x-x_0) \operatorname{tg} \alpha - p[(x-x_0) \operatorname{tg} \alpha]^2}{2p[2a - (x-x_0) \operatorname{tg} \alpha]} \quad (50)$$

W odległości s od osi x prędkość wypadkowa w_w będzie równa

$$w_w = \sqrt{2 w_{y1}^2} = \sqrt{2 w_{y2}^2}. \quad (51)$$

Prędkość w połowie odległości między nawiewnikami w rozpatrywanym przekroju w odległości x będzie równa

$$w_w^2 = w_{y1}^2 + w_{y2}^2$$

czyli

$$w_w = \sqrt{w_{y1}'^2 + w_{y2}'^2} \quad (52)$$

w_w - prędkość wypadkowa wynikająca z nałożenia się strumieni,

w_{y1}', w_{y2}' - prędkości określone dla y_1' oraz y_2'

$$y_1' = a$$

$$y_2' = a - (x - x_0) \operatorname{tg} \alpha$$

czyli

$$w_{y1}' = w_x e^{-py_1'^2}; \quad w_{y2}' = w_x e^{-py_2'^2}.$$

Przykład

Dane: $w_0 = 6,19$ m/s, $w_z = 3,10$ m/s, $w_x = 0,63$ m/s,
 $w_x' = 0,645$ m/s

$$2a = 1,54 \text{ m}, \quad x = 6,0 \text{ m}, \quad x_0 = 5,32 \text{ m}, \quad \alpha = 12^{\circ}30'$$

$$s = \frac{\ln \frac{0,645}{0,630} + 1,54 \cdot 1,9444(6-5,32)0,2217 - 1,9444[(6-5,32)0,2217]^2}{2 \cdot 1,9444[1,54 - (6-5,32)0,2217]} = 0,08 \quad (\text{wg wzoru 48})$$

$$y_1 = a - s = 0,77 - 0,08 = 0,69,$$

$$p = \frac{70}{x^2} = \frac{70}{6^2} = 1,9444,$$

$$w_{y1} = w_x e^{-py_1^2} = 0,63 e^{-1,9444 \cdot 0,69^2} = 0,25 \text{ m/s},$$

$$w_w = \sqrt{2 w_{y1}^2} = \sqrt{2 \cdot 0,25^2} = 0,35 \text{ m/s},$$

miejscowy wzrost prędkości w odległości s

$$\frac{w_w - w_{y1}}{w_{y1}} \cdot 100 = \frac{0,35 - 0,25}{0,25} 100 = 40\%.$$

Prędkość w połowie odległości między nawiewnikami będzie wynosiła

dla

$$y'_1 = a$$

$$w'_{y1} = w_x e^{-py_1'^2} = 0,63 e^{-1,9444 \cdot 0,77^2} = 0,2 \text{ m/s},$$

dla

$$y'_2 = a - (x - x_0) \operatorname{tg} \alpha = 0,77 - (6 - 5,32) 0,2217 = 0,62 \text{ m},$$

$$w'_{y2} = w'_x e^{-py_2'^2} = 0,645 e^{-1,9444 \cdot 0,62^2} = 0,31 \text{ m/s},$$

$$w'_w = \sqrt{w_{y1}'^2 + w_{y2}'^2} = \sqrt{0,2^2 + 0,31^2} = 0,37 \text{ m/s},$$

miejscowy wzrost prędkości w połowie odległości między nawiewnikami wyniesie:

przy prawidłowym układzie strumieni, prędkości na styku strumieni

$$w''_w = \sqrt{2 w_{y1}'^2} = \sqrt{2 \cdot 0,2^2} = 0,28 \text{ m/s}$$

to

$$\frac{w'_w - w''_w}{w''_w} 100 = \frac{0,37 - 0,28}{0,28} 100 = 32\%.$$

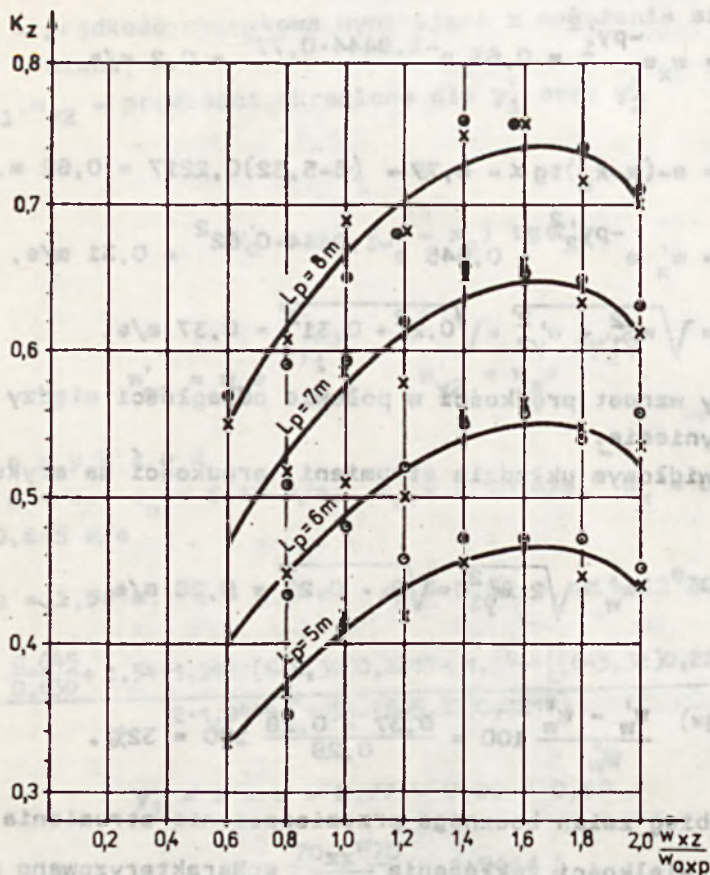
Przebieg zmian bocznego przemieszczenia strumienia uzależniony od wielkości zakłócenia $\frac{w_{xz}}{w_{\text{exp}}}$, scharakteryzowano poprzez współczynnik K_z . Współczynnik ten określa wielkość zmiany przesunięcia strumienia jako funkcję zakłócenia określoną stosunkiem $\frac{w_{xz}}{w_{\text{exp}}}$

$$K_z = \frac{y_{0,2} - y_{0,2p}}{\frac{w_{xz}}{w_{\text{exp}}}}, \quad (53)$$

jeżeli oznaczymy $y_{0,2} - y_{0,2p} = \Delta y$ to będzie

$$K_z = \frac{\Delta y}{\frac{w_{xz}}{w_{\text{exp}}}} \quad (54)$$

Δy jest przyrostem odchylenia wynikającym z deformującego oddziaływania strumienia zakłócającego.



Rys.50. Współczynnik zmiany przesunięcia strumienia K_z w funkcji zakłócenia określonego

stosunkiem $\frac{w_{xz}}{w_{oxp}}$

Wartości współczynnika K_z przedstawiono na rys.50. Wykorzystując tę zależność oraz podstawiając odpowiednie wzory na w_{xz} oraz w_{oxp} przyrost odchylenia strumienia będzie następujący

$$\Delta y = \frac{2,5 w_z \sqrt{\frac{b_H}{\mu \epsilon \gamma_0}}}{\frac{6 w_o \cdot d_o}{x_o}} \quad K_z = 0,42 K_z \frac{w_z x_o \sqrt{\frac{b_H}{\mu \epsilon \gamma_0}}}{w_o \cdot d_o} \quad (55)$$

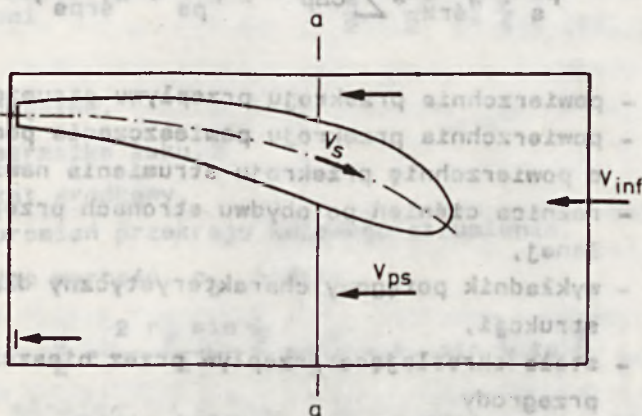
Aby zmniejszyć boczne oddziaływanie strumieni zakłócających, należy przy projektowaniu układu strumieni osiowo-symetrycznych wypływających z nawiewników ściennych zachować odległość między nawiewnikami $2a_{\min}$

$$2a_{\min} = 2a + \Delta y, \quad (56)$$

gdzie

a - połowa odległości między nawiewnikami.

Przy tak obliczanej odległości między nawiewnikami w przypadku niewystępowania zakłócenia, odległość między strumieniami nieco się zwiększy, powstaną pola o zmniejszonym przepływie powietrza. Takie zwiększenie odległości między strumieniami nie zmniejsza w liczącym się stopniu efektywności rozdziału powietrza, a pozwala uniknąć znacznych deformacji, szczególnie nakładania się strumieni i miejscowego sumowania prędkości. Jednocześnie jednak nasuwa się spostrzeżenie, że boczne odchylenie strumienia izotermicznego jest podobne do odchylenia w rzucie poziomym strumienia nieizotermicznego. Pamiętać jednak należy, że przy strumieniu nieizotermicznym następuje zejście strumienia do strefy pracy w innym miejscu niż projektowano.



Rys.51. Model przepływu powietrza przez pomieszczenie dla określenia bilansu powietrza w przekroju a-a

Rozpatrując przemieszczanie powietrza w pomieszczeniu można przyjąć jako charakterystyczny, bilans przepływu powietrza

dla przekroju, w którym następuje największe rozszerzenie strumienia czyli w pobliżu wejścia do strefy pracy. Przepływ powietrzem jak pokazano na rys.51 następuje w dwóch kierunkach, przy czym w kierunku nawiewanego strumienia przez powierzchnię określoną powierzchnią przekroju strumienia.

Bilans powietrza w przypadku ogólnym obejmował będzie także przepływy wynikające z infiltracji powietrza

$$V_s + V_{inf} = V_{ps} \quad (57)$$

gdzie

- V_s - ilość powietrza płynącego w strumieniu nawiewnym w przekroju a-a,
- V_{inf} - ilość powietrza napływającego przez nieszczelności w przegrodach budowlanych,
- V_{ps} - ilość powietrza przepływającego w przekroju pomieszczenia a-a pomniejszonym o pole przekroju strumienia nawiewanego.

Uwzględniając warunki przepływu równanie (57) można zapisać następująco

$$F_s \cdot w_{\text{sr}x} + \sum C\Delta p^{n_1} = F_{ps} \cdot w_{\text{sr}ps} \quad (58)$$

gdzie

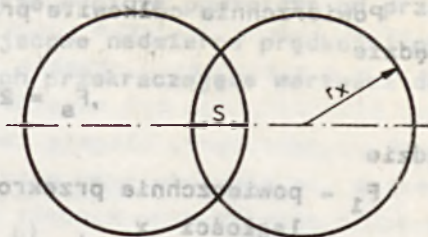
- F_s - powierzchnia przekroju przepływu strumienia,
- F_{ps} - powierzchnia przekroju pomieszczenia pomniejszona o powierzchnię przekroju strumienia nawiewanego,
- Δp - różnica ciśnień po obydwu stronach przegrody budowlanej,
- n_1 - wykładnik potęgowy charakterystyczny dla danej konstrukcji,
- c - stała określająca przepływ przez nieszczelności przegrody

$$w_{\text{sr}ps} = \frac{w_{\text{sr}x} \cdot F_s + \sum C\Delta p^{n_1}}{F_{ps}} \quad (59)$$

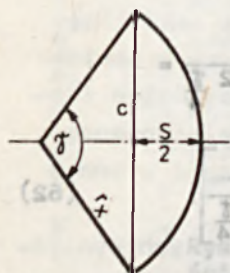
W przypadku występowania strumieni zachodzących na siebie istnieje konieczność określenia pola przekroju przepływających strumieni (rys.52)

$$F_s = \pi r_x^2,$$

$$r_x = x \operatorname{tg} \alpha + \frac{d_o}{2}.$$



Rys.52. Pole przekroju przepływających strumieni



Rys. 53. Pole przekroju przepływających strumieni

Sumaryczne pole przekrojów dwóch strumieni jak pokazano na rys.52 równe jest sumie przekrojów poszczególnych strumieni pomniejszone o odcinek koła.

Pole powierzchni odcinka kołowego (rys. 53) można obliczyć następująco

$$c_o = 2\sqrt{2 \frac{s}{2} r_x - \left(\frac{s}{2}\right)^2} = 2 r_x \sin \frac{t}{2},$$

$$\frac{s}{2} = \frac{c_o}{2} \operatorname{tg} \frac{t}{4},$$

gdzie

c_o - cięciwa,

$\frac{s}{2}$ - strzałka łuku,

t - kąt środkowy,

r_x - promień przekroju kołowego strumienia,

podstawiając wartość c_o będzie

$$\frac{s}{2} = \frac{2 r_x \sin \frac{t}{2}}{2} \operatorname{tg} \frac{t}{4} = r_x \sin \frac{t}{2} \operatorname{tg} \frac{t}{4}$$

powierzchnia odcinka kołowego F_k wynosi

$$F_k = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi t}{180} - \sin t \right) r_x^2,$$

uwzględniając wartość r_x

$$F_k = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi t}{180} - \sin t \right) \frac{\left(\frac{s}{2}\right)^2}{\sin^2 \frac{t}{2} \operatorname{tg}^2 \frac{t}{4}}. \quad (60)$$

Powierzchnia całkowita przepływu strumieni w przekroju x będzie

$$F_s = 2F_1 - F_k, \quad (61)$$

gdzie

F_1 - powierzchnia przekroju strumienia nawiewanego w odległości x

$$F_1 = \frac{\pi d^2}{4} x,$$

czyli

$$\begin{aligned} F_s &= 2 \frac{\pi d^2}{4} x - \frac{1}{2} \left(\frac{\pi r}{180} - \sin r \right) \frac{\left(\frac{g}{2} \right)^2}{\sin^2 \frac{r}{2} \operatorname{tg}^2 \frac{r}{4}} = \\ &= \frac{1}{2} \left[\pi d^2 x - \left(\frac{\pi r}{180} - \sin r \right) \frac{\left(\frac{g}{2} \right)^2}{\sin^2 \frac{r}{2} \operatorname{tg}^2 \frac{r}{4}} \right]. \end{aligned} \quad (62)$$

W oparciu o powyższe obliczenia, średnia prędkość dla powietrza powrotnego przepływającego przez pomieszczenie w oparciu o wzór (59) będzie

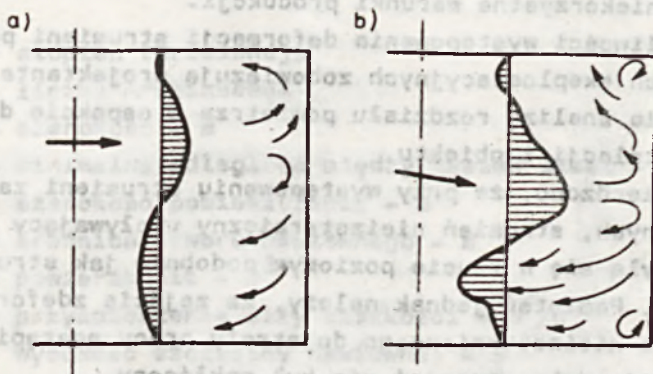
$$w_{\text{śrps}} = \frac{F_s w_{\text{śrx}} + \sum C \Delta p^n}{B \cdot H}, \quad (63)$$

dla wymiarów pomieszczenia $B \cdot H = F_{ps}$ oraz F_s określonego zależnością (61)

$$w_{\text{śrps}} = \frac{w_{\text{śrx}} \frac{1}{2} \left[\pi d^2 x - \left(\frac{\pi r}{180} - \sin r \right) \frac{\left(\frac{g}{2} \right)^2}{\sin^2 \frac{r}{2} \operatorname{tg}^2 \frac{r}{4}} \right] + \sum C \cdot \Delta p^n}{B \cdot H}. \quad (64)$$

Prędkość średnia pozwala na ogólną ocenę warunków przepływu powietrza w strefie pracy przy wyrównanych polach prędkości (rys.54a). Jednocześnie występujące w strumieniach miejscowe wzrosty prędkości (rys.54b) spowodują zakłócenia na wejściu

strumieni do strefy pracy, a także odbicia powietrza od przegrody w różnych kierunkach. Miejscowe nadmierne prędkości powietrza w strumieniach powrotnych przekraczające wartości do-



Rys.54. Przepływ powietrza w końcowej części pomieszczenia: a - przy równomiernym przepływie powietrza; b - przy występujących miejscowych wzrostach prędkości

puszczalne w danych warunkach powinny być eliminowane. Należy dążyć do zachowania równomiernego profilu rozkładu prędkości w strefie pracy określonego prędkością średnią $w_{\text{śrps}} < w_{\text{dop}}$.

11. UWAGI KOŃCOWE

Coraz wyższe wymagania technologiczne i dążenie do uzyskiwania optymalnych warunków mikroklimatu wewnątrz pomieszczeń określają konieczność wzrostu stabilności przemieszczania się powietrza w strefie pracy. Zachodzi potrzeba eliminowania występujących zakłóceń, projektowania rozdziału powietrza odpornego na deformacje oraz uwzględnienia wpływu charakterystyki konstrukcyjno-przestrzennej obiektu.

W trakcie realizacji niniejszej pracy podjęto próbę wyjaśnienia szeregu zagadnień, a także poczyniono kilka spostrzeżeń:

- Występujące niekiedy znaczne deformacje strumieni zmieniają zakładany rozdział powietrza w sposób zasadniczy. Powstają w pomieszczeniu obozary, w których przepływ powietrza i jego kierunek mogą być zupełnie inne niż wymagane w założeniach projektowych. Ulegają zmianie podstawowe parametry powietrza, co niekiedy przy ostrych wymaganiach technologicznych powoduje niekorzystne warunki produkcji.

- Możliwości występowania deformacji strumieni powietrza w warunkach eksploatacyjnych zobowiązują projektanta do przeprowadzenia analizy rozdziału powietrza w aspekcie dynamiki pracy instalacji i obiektu.

- Stwierdzono, że przy występowaniu strumieni zakłócających bocznych, strumień nieizotermiczny wpływający z nawiewnika odchyła się w rzucie poziomym podobnie jak strumień izotermiczny. Pamiętać jednak należy, że zejście zdeformowanego strumienia nieizotermicznego do strefy pracy nastąpi w innym miejscu niż gdyby strumień nie był zakłócony.

- Częściowe nałożenie się strumieni wentylacyjnych wynikające z działania strumieni zakłócających powoduje znaczne miejscowe wzrosty prędkości deformujące przyjęty rozdział powietrza.

- Dla zmniejszenia bocznego oddziaływania strumieni zakłócających należy przy projektowaniu układu strumieni osiowo-symetrycznych wpływających z nawiewników ściennych zwiększyć odległość między nawiewnikami o wartość Δy według wzoru autora (55).

- W obszarach wtórnej cyrkulacji strumienie zakłócające mogą mieć znaczący wpływ na zmianę przemieszczania mas powietrza w stosunku do założeń projektowanego rozdziału powietrza.

- Wypełnienie pomieszczenia urządzeniami i maszynami zmniejsza zasięg strumienia nawiewanego poziomo od kilku do kilkunastu procent.

- Należy ograniczać występowanie poprzecznych strumieni zakłócających poprzez uszczelnianie przegród budowlanych, obudów maszyn i urządzeń, ograniczanie strumieni konwekcyjnych.

Przeprowadzona powyżej analiza oparta jest na rozważaniach teoretycznych oraz badaniach zachowania się strumieni powietrza nawiewanych poziomo i zakłócanych strumieniem poprzecznym

płaskim. Badano strumienie izotermiczne i nieizotermiczne. Uzyskane wyniki pozwalają na wstępną ocenę problemu, jednak nie obejmują całości zagadnienia.

WYKAZ OZNACZEŃ

a	- stopień turbulencji
A_r	- liczba Archimedeasa
b	- szerokość - m
$b_{z \min}$	- minimalna odległość między nawiewnikami - m
B	- szerokość pomieszczenia - m
d_o	- średnica otworu nawiewnego - m
F	- powierzchnia - m^2
g	- przyspieszenie siły ciężkości - m^2/s
h_o	- wysokość szczeliny nawiewnej - m
H	- wysokość pomieszczenia - m
K_o	- stała wylotu
K_B	- współczynnik przy ograniczeniu strumienia
K_Z	- współczynnik zmiany zasięgu strumienia
l_s	- długość pomieszczenia - m
L	- zasięg strumienia - m
L_p	- zasięg strumienia podstawowego - m
L_z	- zasięg strumienia zakłóconego - m
ΔL_z	- przyrost zasięgu strumienia zakłóconego - m
m	- współczynnik przy turbulentnym rozkładzie prędkości
M	- pęd strumienia powietrza
n	- współczynnik przy turbulentnym rozkładzie temperatur
p	- ciśnienie - Pa
Re	- liczba Reynoldsa
T	- temperatura - K
t_{SK}	- średnia ważona temperatura skóry - $^{\circ}C$
t_{SKn}	- temperatura skóry nóg - $^{\circ}C$
t_{SK1}	- temperatura skóry klatki piersiowej - $^{\circ}C$
t_{SKr}	- temperatura skóry rąk - $^{\circ}C$
Δt	- różnica temperatur - $^{\circ}C$
t^u	- podziałka

u	- ugięcie strumienia - m
w	- prędkość powietrza - m/s
w_1	- prędkość w przewężeniu strumienia - m/s
w_k	- prędkość w strumieniu konwekcyjnym - m/s
w_{exp}	- prędkość w strumieniu podstawowym w miejscu przecięcia z osią geometryczną strumienia zakłócającego (bez strumienia zakłócającego) - m/s
$w_{\text{śr}}$	- średnia prędkość przepływu w strefie pracy - m/s
w_x	- prędkość na osi x w odległości x - m/s
w_{xz}	- prędkość w strumieniu zakłócającym w miejscu przecięcia z osią geometryczną strumienia podstawowego (bez strumienia podstawowego) - m/s
w'_x	- prędkość na osi "rzeczywistej" (odchylonej) - m/s
w_x	- prędkość w strumieniu wzdłuż osi geometrycznej po odchyleniu osi rzeczywistej - m/s
w_y	- prędkość w przekroju poprzecznym w odległości y od osi x - m/s
w_{yz}	- prędkość w przekroju poprzecznym strumienia zakłócającego - m
w_z	- prędkość wypływu strumienia zakłócającego ze szczeliny - m/s
x	- odległość wzdłuż osi x - m
y	- odległość od osi geometrycznej nawiewnika - m
$y_{0,2}$	- odległość od osi geometrycznej strumienia punktów, w których prędkość powietrza wynosi 0,2 m/s - m
y	- odległość między punktami leżącymi na osi geometrycznej i osi "rzeczywistej" - m
$y_{0,5}$	- odległość od osi x , w której występuje prędkość równa połowie maksymalnej prędkości w_y - m
$y_{z0,2}$	- odległość od osi geometrycznej strumienia zakłócającego, punktów w których prędkość wynosi 0,2 m/s - m
y_{Am}	- odczucie ruchu powietrza
y_{TS}	- odczucie termiczne
$\frac{M_c}{F_D}$	- jednostkowy strumień ciepła wewnętrznego - W/m^2
α	- kąt między osią geometryczną a osią "rzeczywistą" strumienia zakłóconego

- ϵ - współczynnik przesłonięcia wylotu
- η - współczynnik straty pędu
- θ - efektywna temperatura powietrza w strefie pracy - $^{\circ}\text{C}$
- μ - współczynnik zwężenia (kontrakcji)
- ν - współczynnik lepkości kinematycznej - m^2/s
- φ - wilgotność względna powietrza - %

INDEKSY

- o - wylot powietrza
- x - oś strumienia
- E - głębokość wnikania
- śr - średni
- min - minimalny.

BIBLIOGRAFIA

- [1] P.V. N i e l s e n: Berechnung der Luftbewegung in einem zwangsbelüfteten Raum. Gesundheits-Ingenieur nr 10, 1973
- [2] R. S c h o l z, B. H a n e l: Experimentelle und numerische Untersuchungen von stationären, isothermen, ebenen Strömungen in Räumen unterschiedlicher innerer Geometrie. Gesundheits-Ingenieur nr 10, 1978
- [3] M. J o k l, J. S t r e r a k: Optimum microclimate inside industrial buildings and housing. Gesundh-ing. nr 10, 1970
- [4] E.E. K a r p i s: Luftheizung von Industriegebäuden in der Ud SSR Luft - und Kältetechnik nr 4, 1972
- [5] P.O. F a n g e r: Komfort cieplny, Arkady 1974
- [6] B. O k o ł o w i c z - G r a b o w s k a: Komfort cieplny pomieszczeń ogrzewanych, WPW Budownictwo nr 45, 1976
- [7] Polska Norma PN-78/B-03421 Wentylacja i Klimatyzacja Parametry obliczeniowe powietrza wewnętrznego w pomieszczeniach przeznaczonych do stałego przebywania ludzi. PKN1M 1978
- [8] P.L. M i l l e r: Room air diffusion systems a reevaluation of design data. ASHRAE Transactions cz.2, 1979
- [9] Von P. K a t z: Luftgeschwindigkeiten im klimatisierten Raum HLH 23 nr 9, 1972

- [10] F.H. Rohles, J.E. Woods, R.G. Nevins: The effects of air movement and temperature on the thermal sensations of sedentary man. ASHRAE Transactions cz. 1, 1974
- [11] G. Kraft: Über den Einsatz der Strahlöffnung in Werkhallen Luft und Kältetechnik nr 5, 1971
- [12] T. Rakoczy: Entwicklungstendenzen der Luftdurchlässe bei Raumlufthechnischen Anlagen. Klima-Kälte-Heizung nr 5, 1980
- [13] S. Mierzwiński: Badania aerodynamicznych procesów w dziedzinie oczyszczania gazów, techniki odpylania i wentylacji prowadzone w Politechnice Śląskiej COW nr 11, 1979
- [14] R. Olingsberg: Kaltlufteinblasung in belüfteten Räumen Gesundheits-Ingenieur nr 7, 1967
- [15] H. Günther: Wissensspeicher "Toleranzen für die Klimaregelung" Luft und Kältetechnik nr 1, 1970
- [16] P.L. Miller, R.T. Nash: A further analysis of room air distribution performance. ASHRAE Transactions cz.2, 1971
- [17] T. Jędrzejewska - Ścibak: Zachowanie dopuszczalnych tolerancji wahań temperatury powietrza w strefie pracy pomieszczeń produkcyjnych. WPW Budownictwo nr 19, 1972
- [18] A. Koestel, G.L. Tuve: Performance and evaluation of room air distribution systems. ASHVE Transactions Vol.61, 1955
- [19] J. Makowiecki: Zagadnienia efektywności wentylacji pomieszczeń. COW nr 4, 1970
- [20] B. Mizeliński: Zakłócenia przepływu powietrza w strefie pracy. COW nr 6, 1981
- [21] B. Mizeliński: Zniekształcenia rozdziału powietrza. COW nr 4, 1981
- [22] W.A. Baharijew, W.N. Trojanowski: Wozduszhnoje otoplieniye proizvodstwiennyykh zdaniy z sosredotochiennoj podacziej wozducha. Gosstrojizdat 1960
- [23] H. Schwenke: Über das Verhalten ebener horizontaler Zuluftstrahlen im begrenzten Raum. Luft und Kältetechnik nr 5, 1975
- [24] S. Majerski, S. Mierzwiński: Projektowanie wentylacji audytoriów i sal widowiskowych. Nowa Technika w Inżynierii Sanitarnej, Arkady nr 6, 1976
- [25] S. Majerski, Z. Trzeciakiwicz, M. Węsać: Strumieniowy nawiew powietrza do pomieszczeń domów handlowych, COW nr 6, 1976
- [26] H. Schwenke: Zur Luftströmung in Räumen mit Wurflüftung Luft und Kältetechnik nr 1, 1976

- [27] M. I. G r i m i t l i n: Wiertikalnyje silnonieizotermicheskie strui Sbornik Trudow, Leningrad 1965
- [28] R e c k n a g e l - S p r e n g e r: Ogrzewanie i Klimatyzacja. Poradnik Arkady, Warszawa 1976
- [29] B. M i z i e l i ŋ s k i: Wpływ zmiennej charakterystyki hydraulicznej pomieszczenia i układu wywiewnego na pracę wentylacji mechanicznej nawiewnej, Politechnika Warszawska, Warszawa 1975
- [30] M. M a l i c k i: Wentylacja i Klimatyzacja, PWN, Warszawa 1974
- [31] H. W a l d e n, J. S t a s i a k: Mechanika cieczy i gazów w inżynierii sanitarnej, Arkady, Warszawa 1971
- [32] M. H a c k e s c h m i d t: Zur physikalischen Ähnlichkeit zwischen turbulenter Flamme und isothermem Freistrahle. Luft-und Kältetechnik nr 1, 1979
- [33] M. I. G r i m i t l i n: Teorija i rascziet wentilacionnyh strui (sbornik trudow), Leningrad 1965
- [34] I. A. S z e p i e l e w: Aerodinamika wozdusznyh potokow w pomieszczeni Strojizdat, Moskwa 1978
- [35] S. M i e r z w i ŋ s k i: Wentylacja Przemysłowa, Politechnika Śląska, Gliwice 1979
- [36] British Standard 4773: Part 1, 1971 Methods for testing and rating air terminal devices for air distribution system. Aerodynamic system.
- [37] J. M a k o w i e c k i: Warunki wypływu izotermicznego strumienia powietrza przez perforowane nawiewniki w zastosowaniu do wentylacji pomieszczeń, Dys. Politechnika Warszawska, Warszawa 1966

ВЛИЯНИЕ НАРУШАЮЩЕГО ДВИЖЕНИЯ ВОЗДУХА НА ФОРМИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СТРУЙ

К р а т к о е с о д е р ж а н и е

В работе был проведен анализ факторов влияющих на нарушение течения вентиляционной воздушной струи.

Опираясь на теоретические рассуждения и проведенные испытания, была доказана зависимость между выступающими в эксплуатационных условиях нарушениями и формированием нагнетаемых воздушных струй.

Помещено зависимости, дающие возможность понизить влияние нарушений на формирование условий течения воздуха в рабочей зоне.

THE INFLUENCE OF FLOW DISTURBING AIR MOVEMENTS ON THE FORMATION OF VENTILATION AIR STREAMS

S u m m a r y

In the paper the analysis of factors influencing the disturbances of flow of ventilation air streams has been presented.

On the basis of theoretical considerations and of tests being carried out the relationships between disturbances occurring under operating conditions and the formation of blown in air streams have been shown.

The relationships rendering possible to determine the influence of disturbances on the formation of air flow conditions in the fan operation zone are given in the paper.

SPIS TREŚCI

1. Wstęp	3
2. Cel pracy	5
3. Kształtowanie podstawowych parametrów mikroklimatu w strefie pracy	6
4. Prędkość powietrza w strefie pracy	14
5. Charakterystyczne elementy rozdziału powietrza	16
6. Przyczyny zmian kształtu nawiewanych strumieni powietrza	29
6.1. Strumienie konwekcyjne swobodne	29
6.2. Strumienie od infiltracji powietrza zewnętrznego maszyn urządzeń i elementów ruchomych ...	31
7. Strumienie powietrza nawiewanego poziomo	32
7.1. Opis modelu obliczeniowego	41
8. Pomiary przepływu powietrza w pomieszczeniu badawczym	49
8.1. Strumienie izotermiczne	53
8.2. Strumienie nieizotermiczne	57
9. Wpływ strumieni zakłócających na zasięg i kształt strumieni wentylacyjnych w strefie pracy	65
9.1. Zakres deformacji strumienia izotermicznego...	65
9.2. Zakres deformacji strumienia nieizotermicznego	66
10. Czynniki warunkujące stabilizację przepływu powietrza w strefie pracy	68
11. Uwagi końcowe	81
Wykaz oznaczeń	83
Bibliografia	85
Streszczenia	87



C
82 261

BIBLIOTEKA GŁÓWNA

Politechniki Warszawskiej



400000000279555

**BG Magazyn
Podstawowy**