

Stanisław PRZYDROŻNY

Józef BEDNARSKI

Politechnika Wrocławska

BADANIA MODELOWE ORGANIZACJI WYMIANY POWIETRZA W SALI OPERACYJNEJ

Streszczenie. Problem infekcji pooperacyjnych jest ryzykiem każdego pacjenta, za co nie jest odpowiedzialny wyłącznie personel medyczny. Ważnym wymogiem szpitalnych systemów wentylacji jest to, aby przyczyniały się one do utrzymania aseptycznego otoczenia.

Przedstawione w pracy badania wskazują na to, że proponowana w literaturze metoda ukośnej płaszczyzny jest niewłaściwa dla organizacji rozdziału powietrza w sali operacyjnej, gdyż powoduje ona silne mieszanie powietrza nawiewanego z powietrzem pomieszczenia. Wyniki badań pozwoliły jednak znaleźć sposób, który rozwiązuje problem bezpośredniego nawiewu w obszar stołu operacyjnego, co powinno się przyczynić do utrzymania aseptycznego otoczenia.

1. WPROWADZENIE

Jednym z istotniejszych zadań jakie ma do spełnienia urządzenie klimatyzacyjne obsługujące salę operacyjną jest stworzenie takich warunków, w których niebezpieczeństwo powstania infekcji zostanie ograniczone do minimum. Oznacza to, że nie tylko powietrze dostarczane, ale i powietrze znajdujące się w sali operacyjnej powinno być wolne od wszelkiego rodzaju mikroorganizmów oraz pyłu, a również koncentracja ich nie może przekroczyć pewnej dopuszczalnej wartości. Aby spełnić to wymaganie należy ograniczyć do minimum wszystkie drogi rozprzestrzeniania się mikroorganizmów. Osoba projektująca urządzenie klimatyzacyjne dla sali operacyjnej ma wpływ na aereogeniczną drogę przenoszenia mikroorganizmów i pyłu.

Ogólnie można powiedzieć, że klimatyzacja w sali operacyjnej ma do spełnienia trzy następujące zadania:

- stworzyć i utrzymać odpowiedni stan fizyczny powietrza określony temperaturą i wilgotnością względną,
- przez odpowiednio intensywną i prawidłowo zorganizowaną wymianę powietrza zmniejszyć w możliwie dużym stopniu strefę, w której istnieje możliwość wybuchu mieszaniny powietrza z parami środków anestetycznych i nie dopuścić do wzrostu stężenia tych par w jakimkolwiek innym miejscu sali do wartości zbliżonej do dolnej granicy wybuchowości,

- obniżyć w możliwie dużym stopniu zawartość mikroorganizmów w powietrzu sali, zwłaszcza w strefie stołu operacyjnego; postulat ten nabiera szczególnego znaczenia w salach operacyjnych aseptycznych.

2. CEL BADAŃ ROZPŁYWU POWIETRZA W SALI OPERACYJNEJ

Zasadniczym celem badań rozplywu powietrza w sali operacyjnej było ustalenie spośród różnych układów organizacji wymiany powietrza takiego układu, który przy możliwie małej ilości powietrza klimatyzującego spełni swoje zadanie. Optymalną wymianę powietrza w salach operacyjnych charakteryzować muszą trzy własności:

- a) Nawiewane powietrze (odpowiednio uzdatnione, sterylne) powinno docierać w obszar stołu operacyjnego w jak najmniejszym stopniu zmieszane z powietrzem sali operacyjnej.
- b) Uzyskanie korzystnego rozkładu pola temperatur powietrza w sali operacyjnej, a zwłaszcza w obrębie stołu operacyjnego (stworzenie warunków dobrego samopoczucia dla osób wchodzących w skład zespołu operacyjnego).
- c) Uzyskanie właściwego pola prędkości w obszarze stołu operacyjnego przez nadanie powietrzu nawiewnemu odpowiedniej prędkości w otworze nawiewnym, co spowoduje intensywne usuwanie mikroorganizmów wydzielanych przez zespół operujący.

W ramach prowadzonych w Instytucie Inżynierii Chemicznej i Urządzeń Ciepłych Politechniki Wrocławskiej studiów i badań dotyczących wentylacji i klimatyzacji obiektów szpitalnych [1] podjęto pracę mającą na celu ustalenie takiego sposobu organizacji wymiany powietrza w sali operacyjnej, który posiadałby wyżej wymienione trzy własności. Do sprawdzania różnych układów nawiewnych i wywiewnych posłużono się badaniami modelowymi. Oprócz zaproponowanych własnych sposobów organizacji wymiany powietrza badano również takie, które zostały przedstawione w literaturze, tj. strop perforowany z osłaniającą szczeliłą nawiewną [2], strop perforowany, płaszczyzny nawiewne [6] czy też ukośna płaszczyzna perforowana [4].

W niniejszym opracowaniu przedstawiono wyniki badań modelowych ukośnej nawiewnej płaszczyzny perforowanej.

3. MODEL SALI OPERACYJNEJ

Możliwość modelowania procesów przenoszenia ciepła i pędu wynika bezpośrednio z faktu, że podobne w sensie fizycznym zjawiska - niezależnie od skali - opisywane są jednakowymi równaniami różniczkowymi.

Aby modelowanie fizyczne zapewniało w modelu przebieg interesującego nas zjawiska w sposób podobny do przebiegu w rzeczywistym obiekcie w obu przypadkach, istotne kryteria podobieństwa muszą mieć jednakowe wartości

liczbowe. W przypadku badania warunków rozprywu powietrza w salach operacyjnych potrzebne jest modelowanie wymuszonych i naturalnych przepływów powietrza oraz procesów wymiany ciepła. Modelowanie procesów wentylacji omówione jest szerzej w pracy [3] i na bazie informacji zawartej w tym opracowaniu ustalono skalę modelowe.

3.1. Założenia dla obiektu rzeczywistego

Przyjęto następujące wymiary sali operacyjnej:

- długość - 6 m
- szerokość - 6 m
- wysokość - 3,4 m

Są to wartości przyjęte w oparciu o wymiary większości typowych sal operacyjnych. Zgodnie ze współczesnymi tendencjami światowymi w budownictwie obiektów szpitalnych założono, że rozpatrywana sala jest pomieszczeniem wewnętrznym.

Do badań modelowych przyjęto sumaryczną moc oświetleniową w obiekcie rzeczywistego 2,5 kW, przy czym podzielono ją w sposób następujący:

- moc oświetlenia ogólnego $Q_O = 2,0$ kW
- moc lampy bezcieniowej $Q_b = 0,5$ kW.

Średni skład zespołu operacyjnego przedstawia się następująco:

- chirurdzy (operujący i asysta) - 4 osoby
- zespół anestezjologów - 3 osoby
- personel pomocniczy - 2 osoby

Poszczególni członkowie zespołu przy temperaturze powietrza w pomieszczeniu 22°C wydzielają ciepło jawne o mocy:

- zespół operujący (praca ciężka) $Q_{L1} = 420$ W
- zespół anestezjologów (praca normalna) $Q_{L2} = 260$ W
- zespół pomocniczy i pacjent $Q_{L3} = 210$ W.

3.2. Opis stanowiska badawczego

Badany model sali operacyjnej wykonano w stosunku do obiektu rzeczywistego w skali $S_L = 1:1,57$. Skala ta została narzucona wymiarami płyt metalowopoliuretanowych PW-8B, z których został wykonany model oraz wymiarami pomieszczenia laboratorium. Model sali operacyjnej ma postać komory (1) izolowanej cieplnie o wymiarach w planie 3,82 x 3,82 m i wysokości 2,16 m. W jednej ze ścian znajduje się okno z polimetakrylenu metylu (3), które umożliwia obserwację wnętrza modelu. W sąsiedniej ścianie znajdują się drzwi wejściowe (4).

Na ścianie znajdującej się naprzeciwko drzwi wejściowych (4) umieszczono kratkę nawiewną pionową (5). Obok naprzeciwko okna (3) przymocowano ukośną nawiewną płaszczyzną perforowaną (6). W rogach modelu umieszczono

osiem kratki wywiewnych - cztery kratki wywiewne (7) nad podłogą oraz cztery kratki wywiewne (8) pod stropem. Powietrze można odciągać również z obudowy dwóch pasm żarówek (2) oraz obudowy lampy bezcieniowej (15).

We wnętrzu modelu umieszczono w tej samej skali co model sali operacyjnej:

- symulatory zysków ciepła od ludzi, w tym manekiny zespołu operacyjnego (9), zespołu anestezjologów (10), zespołu pomocniczego (11) i pacjenta (12),
- sprzęt pomocniczy w postaci stołu operacyjnego (13) oraz aparatu anestezjologicznego (14),
- lampę bezcieniową.

Symulatory zysków ciepła od oświetlenia oraz przebywających tam osób posiadały niezależne układy zasilania energią elektryczną z możliwością płynnej regulacji mocy.

Układ wentylacyjny modelu składa się z instalacji nawiewnej i trzech instalacji wywiewnych. W skład układu nawiewnego wchodzi: połączone równolegle dwa klimatyzatory "Voltas Crystal" P1-A 16, wentylator promieniowy ŁA-15 (17) oraz sieć przewodów rozprowadzających. Układ przewodów pozwala na nawiewanie powietrza kratką (5) lub ukośną płaszczyzną perforowaną (6).

Usuwanie powietrza z modelu odbywa się trzema niezależnymi układami wywiewnymi:

- wentylator typu GR III (20) wywiewa powietrze poprzez dwie kratki wywiewne dolne (7) umieszczone na ścianie pod ukośną nawiewną płaszczyzną perforowaną,
- wentylator typu GR III (19) może usuwać powietrze poprzez dwie obudowy oświetlenia ogólnego (2) oraz obudowę lampy bezcieniowej (15) lub cztery kratki wywiewne (8) umieszczone pod stropem,
- wentylator typu GR III (21) wywiewa powietrze poprzez dwie kratki wywiewne dolne (7) umieszczone po przeciwnej stronie niż kratki (8).

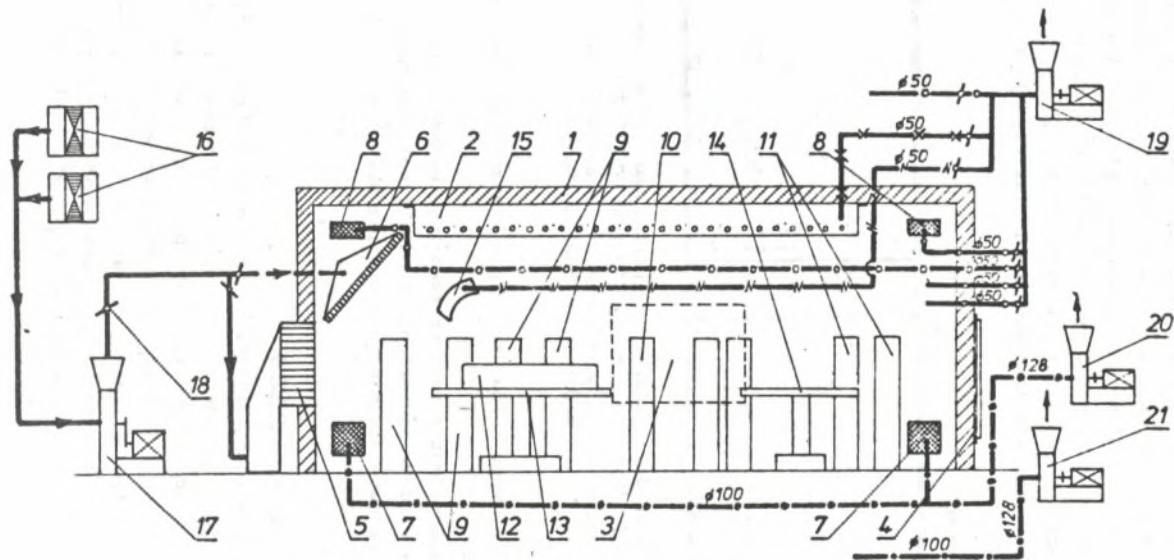
3.3. Metody i układy pomiarowe

W trakcie badań prowadzonych na modelu sali operacyjnej dokonywano następujących pomiarów:

- pomiaru wydajności powietrza nawiewanego i wywiewanego,
- pomiaru temperatury powietrza nawiewanego i wywiewanego,
- pomiaru temperatury powietrza wewnątrz modelu.

Do pomiaru wydajności poszczególnych instalacji wentylacyjnych modelu służyły kryzy pomiarowe obliczone i wykonane wg PN-65/M-53950.

Pomiaru temperatury powietrza dokonywano za pomocą układów pomiarowych składających się z czujników Ni100 typ TON3 i sześciopunktowych rejestratorów temperatury typu MKV. W celu zmierzenia rozkładu temperatury powietrza wewnątrz modelu przesuwano na szynie czujniki temperatury w liczbie 30 sztuk równo rozłożonych na płaszczyźnie pomiarowej.



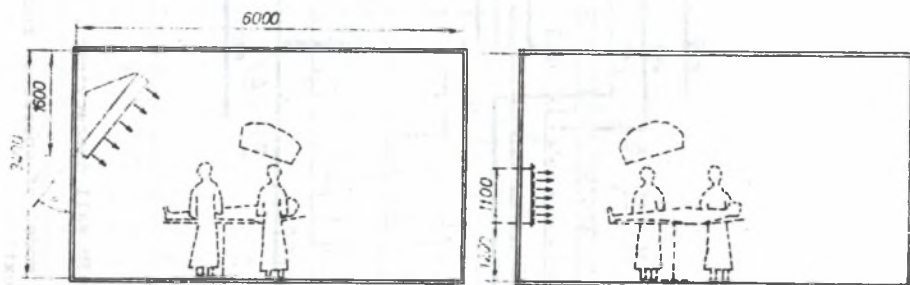
Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego modelu sali operacyjnej
(opis w tekście)

Fig. 1. Diagram of messurement stand for the model of operation room
(description in the text)

4. WYNIKI BADAŃ MODELOWYCH UKOŚNEJ PERFOROWANEJ PŁASZCZYZNY NAWIEWNEJ

4.1. Charakterystyka badanego sposobu organizacji wymiany powietrza

Powietrze nawiewane jest ukośną perforowaną płaszczyzną o powierzchni $F^r = 3,68 \text{ m}^2$ 1600 x 2300 mm. Wymiary te w modelu wynosiły odpowiednio $F^m = 1,5 \text{ m}^2$ 1020 x 1460 mm. Średnica otworków w płaszczyźnie perforowanej dla warunków rzeczywistych i modelowych wynosiły $d^r = 9,5 \text{ mm}$ a $d^m = 6 \text{ mm}$, natomiast odległości między osiami otworków $t^r = 31,5 \text{ mm}$ a $t^m = 20 \text{ mm}$. Stosunek powierzchni otworków do powierzchni płaszczyzny $i^m = i^r = 0,0714$.



Rys. 2. Usytuowanie ukośnej płaszczyzny perforowanej oraz nawiewnika pionowego (wymiarów dla obiektu rzeczywistego)

Fig. 2. Placement of cross perforated plane and vertical ventilator (dimensions of real system)

Badania wykonano dla dwóch kątów nachylenia płaszczyzny nawiewnej do ściany, to jest dla 30° i 45° .

Powietrze odciągane jest z sali kratkami wywiewnymi umieszczonymi nad podłogą oraz przez obudowy oświetleniowe oświetlenia ogólnego i lampy bezcieniowej o objętościowym strumieniu powietrza $0,2 \text{ m}^3/\text{h}$ na 1 W zainstalowanej mocy.

4.2. Rodzaje wersji pomiarowych

W celu uproszczenia identyfikacji poszczególnych wersji pomiarowych wprowadzono ich numerację wg podanego niżej sposobu. Usytuowanie płaszczyzny nawiewnej w stosunku do ściany pod kątem 45° przyjęto oznaczać cyfrą 1, a pod kątem 30° cyfrą 2. Średnią prędkość powietrza nawiewanego V_n [m/s], objętościowe natężenie napływu powietrza do sali \dot{V}_n [m^3/h], krotność wymian ϕ [h^{-1}] oraz objętościowy strumień powietrza wywiewany przez oprawy oświetleniowe \dot{V}_{wo} [m^3/h] i kratki wywiewne \dot{V}_{wk} [m^3/h] dla obiektu rzeczywistego podano w poniższej tabelicy.

Tablica 1

Wersja	W_n	\dot{V}_n	ϕ	\dot{V}_{wo}	\dot{V}_{wk}
1a, 2a	0,20	2650	21,6	500	2150
1b, 2b	0,25	3310	27,1	500	2810
1c, 2c	0,30	3970	32,5	500	3470
1d, 2d	0,35	4640	37,9	500	4140

4.3. Graficzna ilustracja wyników badań

Najistotniejsze dane dla przeprowadzenia analizy wyników pomiarów dostarczają rzeczywiste przyrosty temperatur powietrza w badanym obiekcie. Pozwalają one ocenić pod względem skuteczności działania daną wersję pomiarową. Bazując na wykresach izoterm można wnioskować o intensywności mieszania powietrza nawiewanego z powietrzem pomieszczenia czy też intensywności asymilacji zysków ciepła, jak też o powstawaniu niepożądanych martwych stref. Poniżej na wykresach izoterm przedstawiono wyniki badań poszczególnych wersji pomiarowych. Ze względu na objętość miejsca zajmowaną przez te wykresy ograniczono się tylko do jednej płaszczyzny pomiarowej przechodzącej wzdłuż stołu operacyjnego.

Na wykresach tych podano również w punktach pomiarowych wartości przyrostów temperatur dla warunków rzeczywistych w ten sposób, że przed kreską pionową podano całą wartość stopnia a za kreską dziesiętne części stopnia.

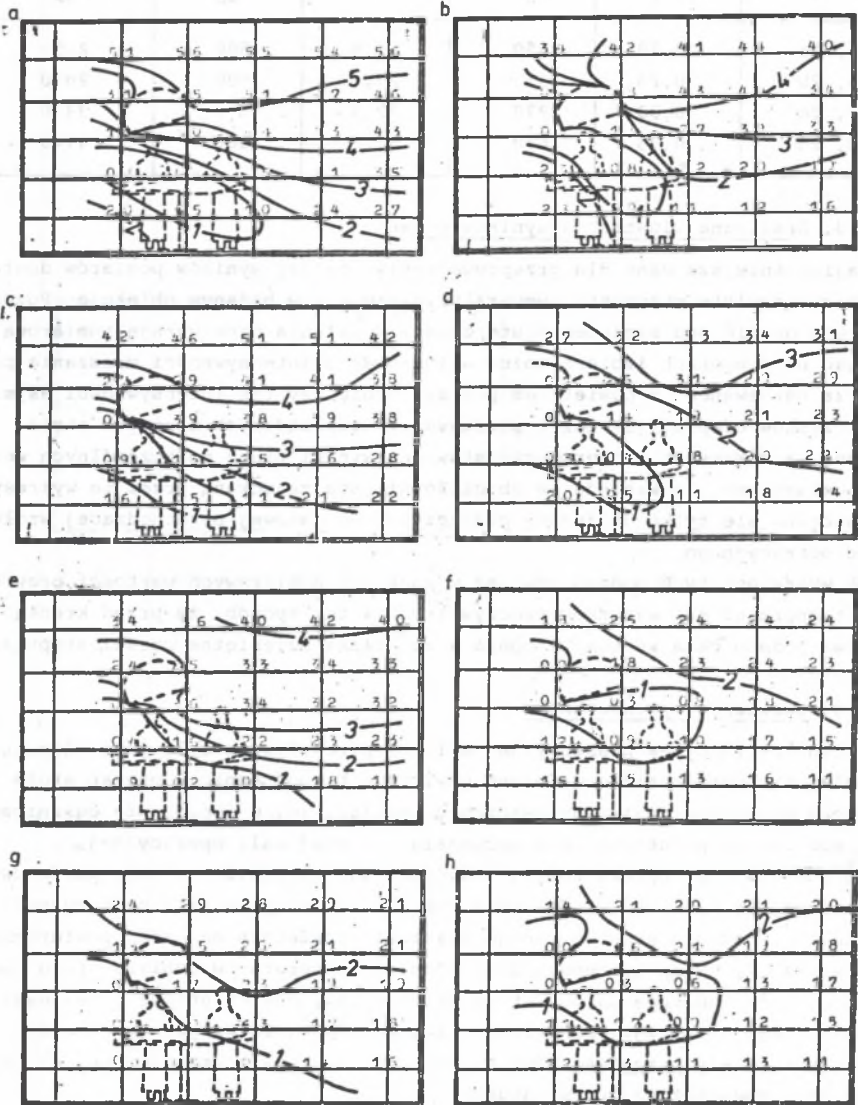
4.4. Omówienie wyników badań

Ukośna perforowana płaszczyzna nawiewna przewidywana była jako element pozwalający doprowadzić uzdatnione powietrze bezpośrednio w obszar stołu operacyjnego z nawiewnika umieszczonego na ścianie, w sposób nie ograniczający możliwości poruszania się personelu po całej sali operacyjnej.

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że duża perforowana płaszczyzna nie jest właściwym elementem nawiewnym w sali operacyjnej. Wynika to z faktu nierównomiernego mieszania powietrza na całej powierzchni płaszczyzny. Stąd występują duże różnice temperatur w pobliżu stołu operacyjnego mimo odciągania powietrza przez oprawy oświetleniowe i nawiewania znacznego strumienia powietrza. Fakt występowania dużych gradientów temperatur należy przypisać również temu, że nawiewnik umieszczony jest w obszarze o podwyższonej temperaturze.

Porównanie pól temperatur dla wersji 1 i 2 dla tych samych ilości powietrza nawiewanego wskazuje, że mniejsze gradienty temperatur uzyskuje się przy kącie nachylenia nawiewnika 30° .

Biorąc pod uwagę warunek, aby zmiany temperatury powietrza w obszarze pracy chirurgów nie przekraczały 2K, wersjami spełniającymi go są: 1d, 2c i 2d. W dalszej części pomieszczenia (czego nie pokazano w tym opracowaniu)



Rys. 3. Pola przyrostów temperatur w obiekcie rzeczywistym

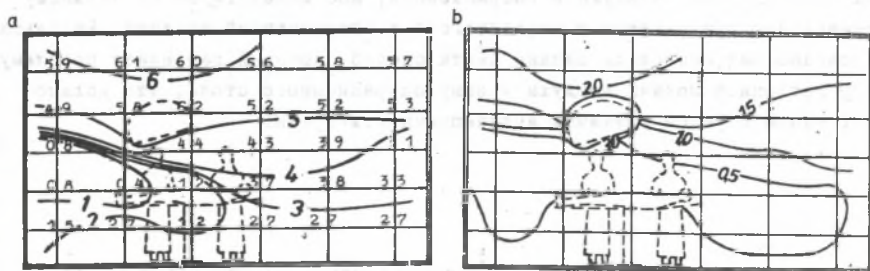
a) wersja 1a, b) wersja 2a, c) wersja 1b, d) wersja 2b, e) wersja 1c, f) wersja 2c, g) wersja 1d, h) wersja 2d

Fig. 3. Incremental fields of temperature in the real plant

gradient temperatur wynosi dla wariantu 1a i 2a około 0,8 K/m, 1b i 2b 0,5 K/m a pozostałych 0,3 K/m.

5. PODSUMOWANIE

Podsumowując całość badań można stwierdzić, że żaden z badanych wariantów nie jest właściwym sposobem organizacji wymiany powietrza w pomieszczeniu sali operacyjnej. Przeprowadzone badania dostarczyły jednak informacji o tym, jak należy właściwie rozwiązać bezpośredni nawiew powietrza. Na rys. 4 pokazano przebieg izoterm w obiekcie rzeczywistym przy nawiewie powietrza przez pionowy nawiewnik z wywiewem [7] i bez wywiewu [1] przez oprawy oświetleniowe. Dla pokazanego przykładu prędkość powietrza nawiewanego wynosiła $w^r = 0,35$ m/s, a krotność wymian $\phi^r = 21,5$ h⁻¹. Z wykresów na rys. 4 widać, że dla zapewnienia niedrogiej i jednocześnie właściwej organizacji wymiany powietrza w sali operacyjnej niezbędne jest usuwanie części powietrza przez oprawy oświetleniowe, w tym koniecznie obudowę lampy bezcieniowej. W przypadku braku odciągu powietrza przez oprawy oświetleniowe niewskazany jest bezpośredni nawiew powietrza z małą prędkością przez duży nawiewnik, lecz kratkami umieszczonymi pod stropem.



Rys. 4. Pola przyrostów temperatur w obiekcie rzeczywistym przy nawiewie powietrza przez pionowy nawiewnik o powierzchni (rzeczywistej) 2,09 m², a) bez wywiewu przez oprawy oświetleniowe, b) z wywiewem przez oprawy oświetleniowe

Fig. 4. Incremental fields of temperature in the real plant with air ventilation using vertical ventilator of the surface (real) 2,09 m²

a) without ventilation through light frames, b) with ventilation through light frames

LITERATURA

- [1] Bednarski J., Przydrożny St. i inni: Badania organizacji wymiany powietrza w sali operacyjnej. Raport SPR 28/81. Politechnika Wrocławska, Wrocław 1981.
- [2] Bentson J.: Krankenhaüs Klimatisierung. Nordisk Ventilator Co. Detroit. Michigan 1970.

- [3] Mierzwiński S., Majerski S.: Modelowanie procesów wentylacji. Nowa Technika w Inżynierii sanitarnej nr 2, Ogrzewanie i Wentylacja, "Arkady", Warszawa 1972.
- [4] Mürmann H.: Lüftungstechnische Anlagen für Krankenaüser. HLH 8/1968.
- [5] Przydrożny S., Bednarski J., Korbut L.: Analiza sposobów organizacji wymiany powietrza w salach operacyjnych, COW 11/75.
- [6] Przydrożny S., Bednarski J., Korbut L.: Wyporowy system przepływu powietrza w salach operacyjnych i stopień sterylności powietrza, COW 12/75.
- [7] Przydrożny S., Bednarski J., Korbut L.: Systemy klimatyzacji bloków operacyjnych. Raport nr R-7/76. Politechnika Wrocławska. Wrocław 1976.

МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОРГАНИЗАЦИИ ОБМЕНА ВОЗДУХА В ОПЕРАЦИОННОЙ

Резюме

Проблема послеоперационных инфекций является неотъемлемой частью риска каждого пациента, за что не всегда виновен медицинский персонал. Важным требованием госпитальных вентиляционных систем является их антисептичность.

Представленные в работе исследования показывают, что предлагаемый в литературе метод наклонной плоскости является несоответствующим для организации распределения воздуха в операционной, ибо содействует он сильному перемешиванию приходящего и находящегося в операционной воздуха. Результаты исследований позволили однако найти способ, который разрешает проблему непосредственной подачи воздуха в зону операционного стола, что должно существенным образом улучшить антисептичность среды.

MODEL STUDIES OF ORGANIZATION OF AIR DISTRIBUTION IN OPERATING ROOMS

Summary

A problem of hospital-acquired infections, a hazard of every patient, is not only the responsibility of the attending medical staff and nursing personnel. An important requirement of a hospital air conditioning system is that it must contribute to the maintenance of an aseptic environment.

Studies presented in the paper indicate that proposed in the literature method of skewed plane is not proper for organization of air distribution in operating rooms, because of strong mixing of air blown in and air inside the operating room. The studies provide a method which solves the problem of direct air blow in the vicinity of operating table which should contribute to maintenance of aseptic environment.