



Politechnika Wrocławska

Wydział Inżynierii Środowiska  
Katedra Klimatyzacji i Ciepłownictwa

# PRACA DOKTORSKA

## **MIKROKLIMAT SAL OPERACYJNYCH W FUNKCJI ORGANIZACJI WYMIANY POWIETRZA**

Autor pracy:

mgr inż. Rafał SPŁAWSKI

Promotor pracy:

prof. dr inż. Gerard Jan BESLER

Słowa kluczowe:

Klimatyzacja sal operacyjnych  
Nawiew laminarny  
Infekcje pooperacyjne  
Prototypowy nawiewnik skośny

*Część badawcza niniejszej pracy finansowana była, m.in.  
ze środków pozyskanych w ramach grantu promotorskiego  
Nr 4T07E 029 27*

Wrocław, grudzień 2006 r.

Panu Profesorowi **Gerardowi Janowi Beslerowi**  
promotorowi pracy,  
Składam serdeczne podziękowanie  
za życzliwą pomoc przy jej tworzeniu.

Kolegom z Katedry Klimatyzacji i Ciepłownictwa,  
Panu dr inż. **Edwardowi Przydróżnemu**  
oraz kierownikowi Zakładu Klimatyzacji i Wentylacji  
Panu dr inż. **Aleksandrowi Pelechowi**  
Dziękuję za cenne rady.

*Autor pracy*

## SPIS TREŚCI

<b>STRESZCZENIE.....</b>	<b>8</b>
<b>I - CZĘŚĆ TEORETYCZNA PRACY.....</b>	<b>9</b>
<b>1. <u>TROCHE O HISTORII ASEPTYKI W MEDYCYNIE.....</u></b>	<b>9</b>
1.1 KLUCZOWE ODKRYCIA XIX w. ....	9
1.2 POCZĄTKI WENTYLACJI W SZPITALNICTWIE.....	11
<b>2. <u>CELOWOŚĆ PODJĘCIA TEMATU .....</u></b>	<b>13</b>
2.1 ZAKAŻENIA SZPITALNE .....	13
2.2 PRZERAŻAJĄCE STATYSTYKI.....	14
2.2.1 Wprowadzenie .....	14
2.2.2 Oddziały podwyższonego ryzyka.....	14
2.3 ZAKAŻENIA POD KONTROLĄ.....	15
2.4 ZAKAŻENIA A KLIMATYZACJA W SZPITALNICTWIE.....	16
<b>3. <u>MIKROKLIMAT SAL OPERACYJNYCH.....</u></b>	<b>17</b>
3.1 CEL I ZADANIA KLIMATYZACJI .....	17
3.2 PARAMETRY MIKROKLIMATU.....	18
3.2.1 Warunki komfortu cieplnego w salach operacyjnych.....	18
3.2.1.1 Temperatura powietrza wewnętrznego.....	18
3.2.1.2 Wilgotność względna powietrza.....	24
3.2.1.3 Prędkość przepływu powietrza.....	25
3.2.2 Czystość powietrza.....	28
3.2.2.1 Minimalny strumień powietrza zewnętrznego.....	28
3.2.2.2 Klasyfikacja czystości pyłowej.....	28
3.2.2.3 Klasyfikacja czystości mikrobiologicznej.....	30
<b>4. <u>PRZEPLÝW POWIETRZA W POMIESZCZENIACH CZYSTYCH .....</u></b>	<b>33</b>
4.1 RODZAJE PRZEPLÝWU POWIETRZA.....	33
4.2 MIARY DOSKONAŁOŚCI SYSTEMÓW ROZDZIAŁU POWIETRZA .....	35

4.2.1	Efektywność wentylacji .....	35
4.2.2	Skuteczność wentylacji .....	37
4.2.3	Sprawność wymiany powietrza .....	37
4.3	PRĘDKOŚĆ PRZEPLÝWU I TURBULENCJA POWIETRZA.....	39
<b>5.</b>	<b><u>SYSTEMY ROZDZIAŁU POWIETRZA – PRZEGLĄD WYBRANYCH ROZWIĄZAŃ</u></b> .....	<b>43</b>
5.1	SYSTEMY KONWENCJONALNE .....	43
5.1.1	Wentylacja mieszająca z zastosowaniem sufitowych nawiewników wirowych...43	
5.1.2	Wentylacja mieszająca z zastosowaniem ściennych nawiewników skośnych.....45	
5.2	SYSTEMY WYPOROWE.....	47
5.2.1	Systemy przejściowe .....	47
5.2.2	Sufitowe nawiewniki laminarne.....	51
<b>II</b>	<b>CZEŚĆ DOŚWIADCZALNA.....</b>	<b>58</b>
<b>1.</b>	<b><u>WPROWADZENIE DO II CZEŚCI PRACY</u></b> .....	<b>58</b>
<b>2.</b>	<b><u>CEL NAUKOWY PRACY</u></b> .....	<b>58</b>
<b>3.</b>	<b><u>OPIS PROWADZONYCH BADAŃ ORAZ PODZIAŁ PRACY NA ETAPY</u></b> .....	<b>59</b>
<b>4.</b>	<b><u>BADANIA STABILNOŚCI PRZEPLÝWU POWIETRZA W WYBRANYCH SALACH OPERACYJNYCH SZPITALI DOLNEGO ŚLĄSKA – ETAP I</u></b> .....	<b>60</b>
4.1	CHARAKTERYSTYKA OBIEKTÓW W KTÓRYCH PRZEPROWADZONO BADANIA.....	60
4.2	PARAMETRY POMIAROWE ORAZ METODYKA BADAŃ.....	60
4.2.1	Aparatura pomiarowa .....	61
4.3	SALA OPERACYJNA SZPITALA POWIATOWEGO W MILICZU PRZY UL. GRZYBOWEJ.....	62
4.3.1	Wyposażenie badanej sali, podstawowe parametry nawiewu oraz siatka pomiarowa .....	62

4.3.2 Wyniki pomiarów i ich wstępna ocena .....	64
4.3.2.1 Analiza sporządzonych wykresów.....	68
4.4 DOLNOŚLĄSKIE CENTRUM ONKOLOGII, PRZY PL. HIRSZFELDA WE WROCŁAWIU.....	71
4.4.1 Wyposażenie badanej sali, podstawowe parametry nawiewu oraz siatki pomiarowe.....	71
4.4.2 Wyniki pomiarów i ich wstępna analiza.....	73
4.4.3 Analiza zamieszczonych wykresów.....	77
4.5 WNIOSKI Z PRZEPROWADZONYCH BADAŃ W OBIEKTACH RZECZYWISTYCH.....	79
4.5.1 Stabilność przepływu powietrza w badanych salach.....	79
4.5.2 Wpływ wielkości sufitu laminarnego na zdolność tworzenia pola sterylnego w strefie chronionej.....	81
4.6 PODSUMOWANIE I ETAPU BADAŃ.....	84
<b>5. <u>KSZTAŁTOWANIE MIKROKLIMATU SAL OPERACYJNYCH Z ZASTOSOWANIEM PROTOTYPOWEGO NAWIEWNIKA SKOŚNEGO W MODELOWEJ SALI OPERACYJNEJ – ETAP II.</u></b> .....	<b>85</b>
5.1 ISTOTA DALSZYCH BADAŃ LABORATORYJNYCH.....	85
5.2 CEL II ETAPU PRACY BADAWCZEJ.....	85
5.3 CHARAKTERYSTYKA NAWIEWNIKA AUTORSKIEJ KONSTRUKCJI, (SLANtinG).....	86
5.3.1 Skrzynka nawiewna.....	86
5.3.2 Kształtka przyłączeniowa rozprężna.....	86
5.4 STANOWISKO BADAWCZE ORAZ POMIAR PODSTAWOWYCH PARAMETRÓW.....	89
5.4.1 Opis stanowiska.....	89
5.4.2 Rozpoznanie zjawisk przepływu powietrza.....	90
5.4.3 Opis badanych wariantów.....	90
5.4.4 Parametry pomiarowe oraz metodyka badań.....	91

5.4.5 Pomiar podstawowych wielkości mierzonych.....	93
5.4.5.1 Pomiar przepływu strumienia powietrza nawiewanego i wywiewanego .....	93
5.4.5.2 Pomiar temperatur powietrza nawiewanego i wywiewanego z pomieszczenia.....	93
5.4.5.3 Pomiar prędkości powietrza oraz temperatur w obrębie działania nawiewnika skośnego.....	94
5.4.5.4 Pomiar oporów nawiewnika.....	95
5.4.6 Zdjęcia stanowiska badawczego.....	95
5.5 WYNIKI POMIARÓW I ICH ANALIZA.....	98
5.5.1 Wyniki pomiarów i wstępna ocena .....	98
5.5.2 Analiza sporządzonych wykresów.....	101
5.5.2.1 Wersja nr 1 i jeden z wybranych wariantów: $V=1400\text{ m}^3/\text{h}$ , $\alpha=30^\circ$ , stół poz.3.....	101
5.5.2.2 Wersja nr 2 i jeden z wybranych wariantów: $V=1400\text{ m}^3/\text{h}$ , $\alpha=45^\circ$ , stół poz.1.....	106
5.5.2.3 Wersja nr 3 i jeden z wybranych wariantów: $V=1400\text{ m}^3/\text{h}$ , $\alpha=60^\circ$ , stół poz.2.....	111
5.5.3 Krótkie podsumowanie .....	116
5.6 WIZUALIZACJA ZJAWISK ZADYMIONYMI STRUMIENIAMI NAWIEWNYMI.....	116
<b>6. <u>MODEL TEORETYCZNY ROZKŁADU PRĘDKOŚCI DLA ZAPROPONOWANEGO SYSTEMU ORGANIZACJI WYMIANY POWIETRZA.....</u></b>	<b>120</b>
6.1 WPROWADZENIE	
6.1.1 Dane wejściowe:.....	120
6.1.2 Dane wyjściowe: .....	121
6.2 PRZEJŚCIE Z KARTEZJAŃSKIEGO UKŁADU WSPÓLRZĘDNYCH $x_0, y_0, z_0$ (ZWIĄZANEGO Z SALĄ OPERACYJNĄ) DO UKŁADU ZWIĄZANEGO Z	

ŚRODKIEM NAWIEWNIKA $x_N, y_N, z_N$ OBRÓCONEGO O KĄT $\alpha$ :	121
6.2.1 Dane wejściowe:	121
6.2.2 Dane wyjściowe:	122
6.3 ZAŁOŻENIA DO MODELU MATEMATYCZNEGO	122
6.4 OSZACOWANIE PRĘDKOŚCI MAKSYMALNEJ W PRZEKROJU ODDALONYM OD NAWIEWNIKA O $z_N$ :	124
6.4.1 Dane wejściowe:	124
6.4.2 Dane wyjściowe:	124
6.5 OSZACOWANIE PARAMETRÓW CZTERECH TURBULENTNYCH STRUG SWOBODNYCH WG WZORU POTĘGOWEGO PRANDTLA	125
6.5.1 Dane wejściowe:	125
6.5.2 Dane wyjściowe:	125
6.6 OSZACOWANIE SKŁADOWYCH PRĘDKOŚCI OD CZTERECH STRUG SWOBODNYCH WG WZORU POTĘGOWEGO PRANDTLA	126
6.6.1 Dane wejściowe:	126
6.6.2 Dane wyjściowe:	127
6.7 OSZACOWANIE PRĘDKOŚCI POWIETRZA W DOWOLNYM PUNKCIE A PRZESTRZENI	127
6.7.1 Dane wejściowe:	127
6.7.2 Dane wyjściowe:	127
6.8 WERYFIKACJA MODELU	127
6.9 UKŁAD WSPÓLRZĘDNYCH ZWIĄZANY Z SALĄ OPERACYJNĄ	128
6.10 PODSUMOWANIE	131
<b>7. <u>NIEPEWNOŚĆ POMIARÓW</u></b>	<b>132</b>
7.1 RACHUNEK BŁĘDÓW	133
<b>8. <u>PODSUMOWANIE WYNIKÓW BADAŃ</u></b>	<b>136</b>
<b>9. <u>WNIOSEK KOŃCOWY</u></b>	<b>138</b>
<b>10. <u>PIŚMIENNICTWO</u></b>	<b>139</b>

## STRESZCZENIE

W rozprawie podjęto problematykę najbardziej racjonalnej organizacji wymiany powietrza w salach operacyjnych. Analizie poddano rozwiązania istniejące, które jak się okazało, najczęściej nie spełniają wymagań dostatecznej sterylności powietrza w obszarze stołu operacyjnego. Powyższe potwierdzono w istniejących obiektach (Szpitalu Powiatowym w Miliczu oraz Dolnośląskim Centrum Onkologii we Wrocławiu).

Przedkładaną pracę doktorską realizowano w dwóch etapach. I etap prowadzony był w obiektach rzeczywistych, II zaś – w laboratorium odpowiadającym wymiarami typowej sali operacyjnej, znajdującym się w budynku Katedry Klimatyzacji i Ciepłownictwa Politechniki Wrocławskiej.

Analizy oraz doświadczenia z prac prowadzonych w Katedrze Klimatyzacji i Ciepłownictwa Politechniki Wrocławskiej skłoniły do zaprojektowania oryginalnego nawiewnika skośnego, nowej konstrukcji. Wykazano, iż organizacja wymiany powietrza w oparciu o jeden wielkogabarytowy nawiewnik skośny, autorskiego projektu jest systemem dającym oczekiwany efekt (w sposób, jak się okazało, wcześniej niemożliwy z zastosowaniem znanych dotychczas rozwiązań - przy dopuszczalnym, zalecanym, minimalnym strumieniu powietrza klimatyzującego, równym  $12\text{h}^{-1}$  wymianom powietrza w salach). Wyznaczono najkorzystniejsze umiejscowienie nawiewnika, tj.: odległość, wysokość zawieszenia i kąt pochylenia płaszczyzny nawiewnej względem stołu operacyjnego.

Z zastosowaniem matematycznych narzędzi statystycznych wyprowadzono formułę na obliczenie przewidywanej prędkości ruchu powietrza, w dowolnym punkcie przestrzeni sali operacyjnej. Napisano program obliczeniowy (możliwy do wykorzystania w celach projektowych), który działa bez konieczności każdorazowej modyfikacji, ale w odniesieniu do stałych źródeł ciepła przyjętych do wyznaczenia modelu oraz zmiennych wejściowych w zakresie odpowiadającym prowadzonym badaniom.

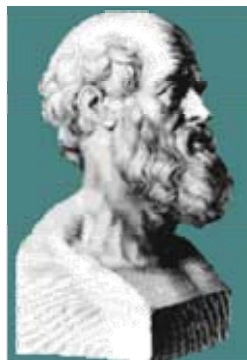


## I - CZĘŚĆ TEORETYCZNA PRACY

### 1. TROCĘ O HISTORII ASEPTYKI W MEDYCYNIE

#### 1.1 KLUCZOWE ODKRYCIA XIX w.

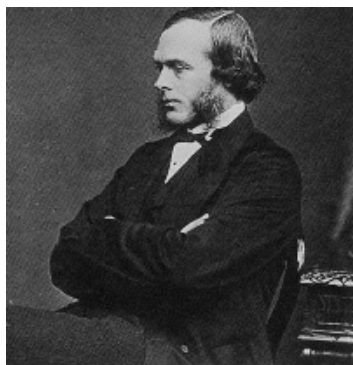
Kto kiedykolwiek złamał nogę, ten wie jakie to bolesne i kłopotliwe. Specjalistyczne leczenie pomimo wielu niedogodności, podczas długotrwałej rekonwalescencji, powoduje jednakże ostatecznie możliwość powrotu do pełni sił. Także wówczas, gdy złamana kość spowodowała rozerwanie mięśni i skóry (tzw. złamanie otwarte). Ale jeszcze 150 lat temu, złamana noga najczęściej była amputowana, a taki zabieg kończył się często śmiercią (u co najmniej połowy operowanych). Pacjenci umierali najczęściej w wyniku infekcji, nabytej podczas zabiegu, co było naturalną konsekwencją poranienia [1]. Już w roku 400 p.n.e. grecki uczyony *Hipokrates* (rys.1.1), mówił o zbawiennym wpływie czystego powietrza na ograniczenie rozprzestrzeniania się chorób zakaźnych [2]. Trzeba jednakże było czekać jeszcze wiele wieków na ogłoszenie pierwszych teorii, dotyczących przyczyn rozprzestrzeniania się zakażeń i stosowania środków zachowawczych, zwłaszcza w chirurgii.



Rys.1.1 *Hipocrates* [2]

Współczesna chirurgia nie odnosiłaby sukcesów, gdyby nie pokonano trzech największych przeszkód na drodze jej rozwoju: panowania nad krwawieniem, bólem i infekcjami. Umiejętności radzenia sobie z krwotokami opisano już w XVI w. Natomiast rozwój anestezji i aseptyki przypada dopiero na okres II połowy XIX w. [1]. Ryzyko infekcji pooperacyjnych, prowadzące do dużej śmiertelności wśród operowanych, zawsze obecne w historii medycyny, jest wciąż dużym „zmartwieniem” dzisiejszego szpitalnictwa.

Wielkim uczonym, którego odkrycia doprowadziły do zamknięcia tego tragicznego rozdziału w dziejach chirurgii, był *Joseph Lister* (1827-1912), profesor uniwersytetów w Glasgow i Edynburgu. Nazywany jest dziś ojcem współczesnej chirurgii (rys.1.2) [3].



Rys.1.2 *Joseph Lister* (1827-1912) [3]



Rys.1.3 Aparat (*carbolic steam spray*) służący do dystrybucji fenolu w powietrzu sali operacyjnej; *Guy's Hospital* – koniec XIX w. [3]

W roku 1867 *Lister* opublikował pierwszy w historii raport z zakresu aseptyki, w którym zwrócił uwagę na korzyści wynikające z redukcji cząstek zanieczyszczeń w powietrzu sali operacyjnej [4]. Słusznie przypuszczał, że mikroorganizmy unoszące się w powietrzu (odkryte niewiele lat wcześniej przez *Ludwika Pasteura*), dostają się do rany i mogą wywoływać infekcje. Zalecił, w związku z tym, opryskiwanie otwartej rany podczas operacji, a także powietrza sali operacyjnej karbolem (carbolic spray, znany pod nazwą fenolu) (*rys.1.4*).



*Rys.1.4 Malunek przedstawiający przebieg operacji w późnych latach XIX wieku; w środku zespołu Joseph Lister; po prawej stronie mężczyzna z aparatem do rozpylania fenolu w pobliżu rany operowanego.[5]*

Ponadto (jako pierwszy chirurg w historii medycyny), nakazuje używanie podczas operacji gumowych rękawiczek, białych fartuchów i sterylnie umytych narzędzi chirurgicznych [6]. Dzięki *Listerowi* i jego aseptycznej teorii, liczba zgonów zmalała z 80%, nawet do 6% (w niektórych europejskich szpitalach) [3]. W świadomości lekarzy pojawiła się teza, iż duży stopień śmiertelności wśród operowanych, spowodowany jest rozprzestrzenianiem się w powietrzu sali operacyjnej bakterii, wnoszonych z zewnątrz m.in. przez personel operujący. Stwierdzono, że bakterie te osiadają na stole operacyjnym oraz na ranie operowanego. Jednakże przyjęcie przez lekarzy w pełni tej nowej, rewolucyjnej jak na owe czasy teorii, zajęło jeszcze wiele lat. Nie od razu uświadomiono sobie jak ważne jest przestrzeganie tych zasad. Jeszcze przez jakiś czas po przełomowych odkryciach *Pasteura* i *Listera*, kontynuowano zabiegi w salach operacyjnych, wyposażonych w drewniane stoły operacyjne (*rys.1.5*), przy użyciu drewnianych instrumentów chirurgicznych (*rys.1.6*), nie przywiązując większej wagi do zmiany stroju lekarzy, okazjonalnie tylko wymienianego [7].

Podstawowym wyznacznikiem przy budowaniu i wyborze miejsca na sale operacyjne było zapewnienie dobrego dopływu światła dziennego (*rys.1.7*), najczęściej poprzez duże przeszklenia w suficie (*rys.1.5*). Amfiteatralne zwykle wnętrza sali, zapewniało doskonałą

możliwość obserwowania przez młodych adeptów medycyny, trudnej sztuki operacji chirurgicznych [7]. Nadal przeprowadzano zabiegi przy udziale wieloosobowej publiczności i to przyczyniało się do wzrostu liczby zarazków wnoszonych na sale operacyjne.



Rys.1.5 Zdjęcie przedstawiające wnętrze sali operacyjnej XIX w. (The Old Operating Theatre, Museum & Herb Garret, 9a St. Thomas St, London SE1 9RY)[7]



Rys.1.6 Noże chirurgiczne z drewnianymi uchwytami (ekspozycja stała - The Old Operating Theatre, Museum & Herb Garret, 9a St. Thomas St, London SE1 9RY)[7]



Rys.1.7 Zdjęcie sali operacyjnej szpitala w Glasgow - Royal Infirmary, rok 1914; wykonane 5 lat po otwarciu nowego bloku operacyjnego im. Robert`a i James`a Dick Block (fundatorów kosztownej modernizacji szpitala); każde z sześciu pięter nowego bloku posiadało własną salę operacyjną o wysokim standardzie. [8]

## 1.2 POCZĄTKI WENTYLACJI W SZPITALNICTWIE

„Na początku wszystkiego co wielkie- znajdziesz kobietę”

[Alphonse de Lamartine (1790-1869)]

*Florence Nightingale* (rys. 1.8) była (prawdopodobnie pierwszą na świecie) pielęgniarką, która kładła duży nacisk na czystość powietrza wewnętrznego i wentylacji w szpitalnictwie [10]. Uznaje się ją za prekursorkę w zakresie dziedziny zdrowia publicznego. Dzieła jej autorstwa, dotyczące rozwiązań przestrzennych w szpitalnictwie, zwłaszcza w kontekście aseptyki, znane były na całym świecie. Jej przekonania były nieco błędne (aczkolwiek zgodne z ówczesnym trendem). Początek jej działalności przypada bowiem na okres przed opublikowaniem teorii *Listera*, kiedy wierzono iż infekcje rozprzestrzeniają się zupełnie spontanicznie w brudnych i słabo wentylowanych pomieszczeniach. To jednak nie pomniejsza olbrzymich zasług jako pioniera w popularyzacji przestrzegania zasad higieny w szpitalach a zwłaszcza salach operacyjnych. W okresie swojej długoletniej działalności przekazywała swą wiedzę kilku pokoleniom pielęgniarek, a wypowiedziane przez nią zdanie: „...pacjentowi należy zapewnić powietrze do oddychania tak czyste jak powietrze zewnętrzne, przy czym nie należy powodować wychładzania organizmu”, zapisało się w historii jako podstawowy kanon pielęgniarstwa. Głosiła, iż bez spełnienia tego warunku, cała reszta działań wobec pacjenta jest niewiele warta.[10]



Rys. 1.8  
*Florence Nightingale*  
(1820-1910) [9]

W tamtych latach problem braku wentylacji (utożsamiany z nieprzyjemnym zapachem) pojawiał się zasadniczo w okresie zimnym, kiedy zamykano wszelkie otwory zewnętrzne, służące napływowi zimnego powietrza zewnętrznego, celem ograniczenia strat ciepła. W efekcie brakowało jakiegokolwiek wymiany powietrza w pomieszczeniu. *Nightingale* miała nadzieję, że rozpylanie karbolu w powietrzu sali operacyjnej, zmusi chirurgów do otwierania okien, wobec towarzyszącego rozpylaniu nieprzyjemnego zapachu. Sama proponowała następującą metodę wentylowania pomieszczeń zimą: wlot powietrza do pomieszczenia przez okno uchylone tuż przy suficie, zaś wylot - na poziomie podłogi, poprzez ciąg kominkowy [10] wywołany powietrzem potrzebnym do spalania. Należy wyjaśnić, iż w tamtych czasach w Anglii i Szkocji, ogrzewanie kominkowe grało wiodącą rolę w ogrzewaniu wszelkich pomieszczeń, w tym również sal zabiegowych i operacyjnych.

Opisany sposób można uznać za pierwszy w historii system organizacji wymiany powietrza w salach operacyjnych. *Nightingale* należy się miano pioniera wentylacji w szpitalnictwie. Francuski dramatopisarz XX w. *Marcel Achard* (1899-1974) kiedyś powiedział: „Siła kobiet nie tkwi w tym co mówią, ale w tym ile razy to powtarzają”. Czyż nie to właśnie stanowiło o powodzeniu działań samej *Nightingale* ?

## 2. CELOWOŚĆ PODJĘCIA TEMATU

### 2.1 ZAKAŻENIA SZPITALNE

Czystość powietrza wewnętrznego w szpitalach jest zagadnieniem podstawowym. Prezes PTZS - M. Bulanda niedawno stwierdziła: „Im bogatszy kraj i nowocześniejsza medycyna, tym zagrożenie wystąpienie zakażenia szpitalnego jest potencjalnie większe. Zakażeń nie będzie tylko wtedy, gdy w szpitalu w ogóle nie będzie chorych. Tylko, że wtedy nie będzie też szpitala. Każda hospitalizacja niesie za sobą konieczne ryzyko.” [11] Współcześnie – paradoksalnie – w nowoczesnej medycynie, która ratuje życie wielu ciężko chorym pacjentom, zakażenia stały się jednym z kluczowych powikłań. Zapadalność na zakażenia szpitalne jest dzisiaj wyjątkowo dobrym wskaźnikiem jakości usług oferowanych przez szpitale [11]. W literaturze światowej znane jest pojęcie ‘*nosocomial infections*’ z ang. /*nosos* – choroba i *komein* – leczenie (z łac.)/ na określenie infekcji powstałych podczas pobytu pacjenta w szpitalu, w trakcie leczenia pierwotnego schorzenia, które było powodem skierowania go do szpitala. Kiedy taki rodzaj infekcji zostaje ujawniony i dowiedziony, wówczas odpowiedzialność leży całkowicie po stronie placówki medycznej w której pacjent przechodził leczenie [11]. *Mills* [12] przenosi tę definicję również na tych, którzy zostali zakażeni, przebywając w szpitalu tylko w charakterze osób odwiedzających i stanowiących personel szpitala. Obecnie jest coraz więcej procesów sądowych, wytaczanych placówkom medycznym przez poszkodowanych pacjentów i najczęściej rozstrzyganych na ich korzyść [11]. Doc. *Bulanda* [11] twierdzi, iż „dawniej przeważały dochodzenia z zakresu zakażeń wirusowych, WZW B czy C, gdzie ustalenie prawdopodobieństwa winy szpitala było bardzo trudne, gdyż okres wylegania przy chorobach wirusowych trwa czasem nawet pół roku. Dziś nadeszła era zakażeń o etiologii bakteryjnej. Tutaj prawidłowość zastosowanych metod rozpoznawania i terapii jest już bardzo łatwa do oceny. Dochodzenia są łatwiejsze, a werdykty zazwyczaj niekorzystne dla szpitali.” [11] W Polsce jest coraz więcej pacjentów zagranicznych, którzy bardzo zwracają uwagę na jakość świadczonych usług i na poziom ubezpieczenia placówki, w której planują się leczyć. Doc. *M. Bulanda*, (prezes Polskiego Towarzystwa Zakażeń Szpitalnych) jest w stanie wyobrazić sobie, że zakażony zagraniczny pacjent może zrujnować do cna polski szpital [11].

Koszty wywołane tego typu zagrożeniami mogą zatem być olbrzymie. Dlatego nad zjawiskiem należy zapanować. Wprowadzenie czynnego nadzoru mikrobiologicznego i epidemiologicznego generalnie jest opłacalne, przynosząc placówce medycznej choćby bardzo wymierne oszczędności w polityce antybiotykowej.

W 1995 r. Szwedzki Instytut Kontroli Zakażeń (*Swedish Institute for Infectious Disease Control*) przedstawił dane mówiące o kosztach rzędu 100.000 US \$, przypadających na leczenie powikłań jednego pacjenta, zakażonego w trakcie operacji na otwartym stawie kolanowym. Są to dodatkowe koszty leczenia, jakie ponosi szpital [13]. W raporcie przedstawionym w styczniu 2000 r. [14] w Wlk. Brytanii, stwierdzono iż koszty dodatkowe na leczenie infekcji wewnątrzszpitalnych (*acquired infections*, syn. *nosocomial*) dochodzą do ok. 1 biliona funtów rocznie [14]. Wydłuża się również okres pobytu pacjenta w szpitalu, który też kosztuje. Problem medyczny staje się zatem dziś również problemem ekonomicznym.

## 2.2 PRZERAŻAJĄCE STATYSTYKI

### **2.2.1 Wprowadzenie**

O wadze problemu czystości powietrza w szpitalach, a zwłaszcza w salach operacyjnych, świadczą dane statystyczne. „Określa się ich skalę na nie mniej niż 10% operowanych pacjentów (w skali światowej)” [15]. „Światowa Organizacja zdrowia (*WHO*), podaje że od 3-5% zakażeń jest bezpośrednią przyczyną zgonów, a 8% - wtórną. Oznacza to, że w Polsce każdego roku prawdopodobnie umiera z tego powodu 74 000 – 88 000 hospitalizowanych osób” [15]. Sytuacja na świecie jest alarmująca. Każdego roku we Francji od 60.000 – 100.000 pacjentów stwierdza nabawienie się infekcji w trakcie pobytu w szpitalu. Odpowiada to od 6% do 10% wszystkich poddających się leczeniu rocznie [16]. Od 5 000 do 10 000 z nich umiera na skutek tych zakażeń. W aspekcie szeroko rozumianego zagadnienia zdrowia publicznego, dane te są podobnie przerażające, jak statystyki śmiertelnych wypadków samochodowych (7.800 ofiar śmiertelnych w 2002 r. we Francji [16]). Wspomniany już wcześniej Raport Rządu Wlk. Brytanii z roku 2000 wykazał, iż z powodu infekcji pooperacyjnych, np. w Szkocji, umiera rocznie więcej ludzi niż ginie tam w wypadkach samochodowych. Dane pochodzące z tego samego roku dla USA, dowodzą iż u 1.8 miliona Amerykanów infekcje rozwinęły się na skutek zakażeń w trakcie lub po operacji. Dla 88 tys. (ok. 5%) z nich, zakończyły się tragicznie (śmiercią) [12].

### **2.2.2 Oddziały podwyższonego ryzyka**

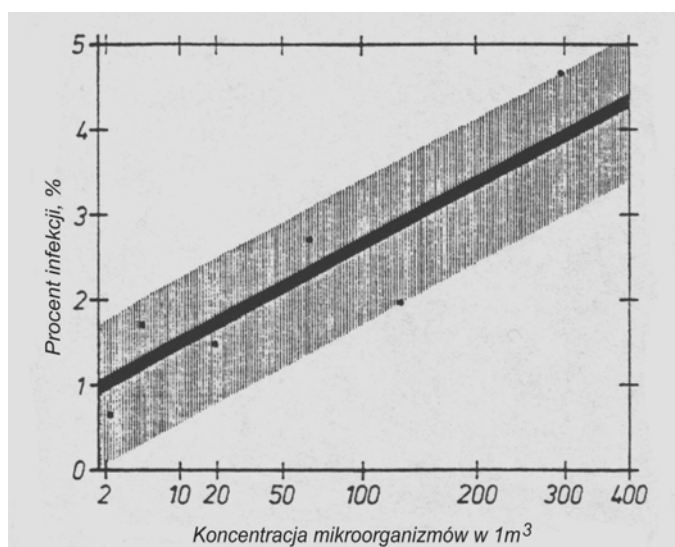
W oddziałach, gdzie nie ma zbyt wielu procedur inwazyjnych, odsetek zakażeń endemicznych, a więc powstałych na terenie szpitala jest minimalny. Natomiast zakażeń egzogennych, tj. wnoszonych i rozwijających się z powodu niedostatecznej dbałości o higienę szpitala - nie powinno być wcale. Tymczasem w oddziałach zabiegowych, liczba zakażeń sięga nawet 20% i taki wynik uznawany jest za przyzwoity. Trudno jest porównywać różne oddziały

szpitala, np. oddział okulistyczny, wykonujący jedynie zabiegi planowe, z urazową ortopedią, prowadzącą ostre dyżury [11]. Infekcje pooperacyjne stanowią dziś główny problem przede wszystkim chirurgii. Prawie 70% wszystkich zakażeń szpitalnych następuje w oddziałach operacyjno-zabiegowych [17]. *Surgical Site Infections (SSIs)* [18] stanowią główną przyczynę licznych zgonów na skutek zakażeń szpitalnych.

Badania wykonane w Szwecji dowodzą, iż śmiertelność wywołana zakażeniami podczas zabiegów przeszczepu aorty jest w zakresie 30-70% operowanych [19]. Śmiertelność podczas zabiegów stawu biodrowego oraz kolanowego waha się od 2÷6%, a ryzyko trwałego inwalidztwa jest w okolicach 60% [20, 21]. Opisane wyżej zabiegi obok chirurgii oparzeń i neurochirurgii należą do grupy wymagających szczególnej aseptyki środowiska sali operacyjnej.

### 2.3 ZAKAŻENIA POD KONTROLĄ

Jak wskazują dane statystyczne i ogólna wiedza, szczególnej czystości i nawet wysokiej aseptyki wymagają przede wszystkim sale i całe bloki operacyjne. To im poświęca się najwięcej miejsca w publikacjach naukowych z tego zakresu. Dziś już nie trzeba nikogo przekonywać, że to właśnie cząstki zanieczyszczonego powietrza niosą ze sobą zarazki wirusów i bakterii. Badania prowadzone przez *O. M. Lidwell'a*, który obserwował ok. 8100 operacji stawu biodrowego i łokciowego [22] oraz *E. A. Salvati* – ok. 3200 operacji [23], dowodzą, iż zmniejszenie stężenia mikroorganizmów w powietrzu sali operacyjnej ogranicza znacząco liczbę infekcji pooperacyjnych [24, 25]. Wg *Lidwell'a* zależność tę można określić w sposób zadawalający poprzez wykres prostej, gdzie liczbę występujących infekcji określa pierwiastek



Rys.1.9 Koncentracja mikroorganizmów, a procent infekcji [26]

kwadratowy liczby cząstek mikroorganizmów w powietrzu (*rys.1.9*) [26]. Prawdopodobnie istnieje także dolna granica, poniżej której redukcja liczby cząstek zanieczyszczeń w powietrzu nie ma istotnego wpływu na liczbę zakażeń pooperacyjnych. Oznaczałoby to, że nie ma wtedy uzasadnienia do dalszego zwiększania nakładów inwestycyjnych, na poprawę jakości powietrza w sali operacyjnej [26, 27]. Można przyjąć, że dzieje się tak przy redukcji liczby bakterii do ok. 5 KBE/m<sup>3</sup> [26].

#### 2.4 ZAKAŻENIA A KLIMATYZACJA W SZPITALNICTWIE

Poza całą grupą regulacji dotyczących systemu przeciwdziałającego przenoszeniu zakażeń, coraz większą wagę przykłada się dziś - słusznie, do urządzeń kształtujących w sposób bezpośredni mikroklimat pomieszczeń szpitalnych, zatem do systemów wentylacyjnych i klimatyzacyjnych. Klimatyzacja sal i całych bloków operacyjnych jest współcześnie uznawana jako niezbędna instalacja technologiczna. Poza stwarzaniem i zachowaniem najbardziej odpowiednich warunków, co do temperatury, wilgotności i prędkości powietrza, bardzo ważnym zadaniem jest ograniczenie liczby cząstek zanieczyszczeń, zwłaszcza w obszarze pola operacyjnego [28].

Istnieje wiele czynników mogących skutkować zakażeniem pacjenta podczas zabiegu chirurgicznego. Czynnikiem ograniczającymi to ryzyko, są m.in. właściwa wentylacja w sali operacyjnej, odpowiednie ubranie zespołu operującego, ograniczenie liczby osób uczestniczących w zabiegu. Do grupy zagrożeń związanych bezpośrednio z pacjentem, należą: ogólna kondycja operowanego, odporność organizmu. Zastosowana osłona antybiotykowa, czystość narzędzi operacyjnych, zastosowane implanty (przy operacjach przeszczepów), są niezmiernie ważne. Na infekcje mają ponadto wpływ: okres pobytu i jakość obsługi chorego podczas pobytu w szpitalu po zabiegu, występujące krwotoki, liczba transfuzji krwi, mikroflora szpitala i inne [29]. Francuzi proponują wyznaczenie dwóch współczynników wpływających na potencjalne ryzyko infekcji pooperacyjnych. Oba przyjmują wartości od 1 do 4. Pierwszy z nich – *Pr*, określa poziom trudności przeprowadzanego zabiegu i dotyczy samych procedur chirurgicznych, drugi – *P*, określa ryzyko związane ze stanem zdrowia pacjenta (m.in.: wiek, efektywność terapii antybiotykowej, ogólną odporność organizmu, etc.) [16]. Kombinacja tych dwóch daje wynik od 1 – 16 i określa prawdopodobieństwo wystąpienia infekcji pooperacyjnej (*tab.1.1*). Skala zagrożenia ujęta została w cztery strefy ryzyka. Wynik 12 – 16 wskazują na strefę 4 (bardzo wysokiego ryzyka), 6 – 9: strefa 3 (wysokiego ryzyka), 2 – 4: strefa 2 (umiarkowanego ryzyka), 1: strefa 1 (niskiego ryzyka). Na podstawie *tab.1.1* przykładowo do grupy pomieszczeń odpowiadających poziomowi ryzyka równemu 4, należą następujące



oddziały chirurgiczne: Intensywna Terapia, Okulistyka, Chirurgia Oparzeń, Chirurgia Naczyniowa, Neurochirurgia i Ortopedia.

Tab. 1.1 Tabela do wyznaczania klasy ryzyka infekcji pooperacyjnych, gdzie:  $Pr$  – współczynnik określający ryzyko związane z procedurami;  $P$  - współczynnik określający ryzyko związane z pacjentem:

$1 \div 4$ : rosnąca skala ryzyka [16]

<b>Pr</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>P</b>				
1	1	2	3	4
2	2	4	6	8
3	3	6	9	12
4	4	8	12	16

W ostatnim wydaniu normy francuskiej NF S90-351 z roku 2003 [89] odnoszącej się do kontroli mikroklimatu czystych pomieszczeń w budynkach szpitalnych, umieszczono wskazówki dot. projektowania, utrzymywania i eksploatacji urządzeń służących do obróbki powietrza wentylującego. Dla każdej z wyznaczonych na podstawie *tab.1.1* stref, szczegółowo opisano wymagania dot. przykładowo liczby stopni filtracji w układzie obróbki powietrza nawiewanego, miejsca ich usytuowania, rodzaju nawiewu powietrza (laminarny czy konwencjonalny), minimalnej krotności wymian powietrza. Wskazano także europejskie normy, które należy uwzględnić w sposób związany [16]. Takie podejście jest zgodne z obecnym trendem powstających nowych norm i wytycznych dot. zagadnień klimatyzacji w salach operacyjnych.

### 3. MIKROKLIMAT SAL OPERACYJNYCH

#### 3.1 CEL I ZADANIA KLIMATYZACJI

Szpitalne są rodzajem obiektów, w których kształtowanie mikroklimatu pomieszczeń jest, w porównaniu z innymi obiektami, zadaniem wyjątkowo trudnym [28]. Jakość powietrza wewnętrznego (*Indoor Air Quality*) w szpitalnictwie jest najwyższym wyzwaniem dla inżynierów klimatyzacji i wentylacji, m.in. za sprawą kluczowego znaczenia aseptyki dla zdrowia i życia pacjentów. Jest wiele niebezpiecznych drobnoustrojów, rozwijających się silnie w sprzyjającym środowisku, a wnoszonych do szpitala przez zainfekowanych pacjentów oraz personel medyczny. Drobnoustroje te trafiają na podatny grunt za przyczyną zmniejszonej odporności, a także wielu stosowanych procedur ułatwiających przedostanie się do organizmu pacjentów, zwłaszcza np. w chirurgii otwartej rany. Za *Porowskim i Szczechowiakiem* [30] oraz

na podstawie przytoczonych wcześniej danych statystycznych, z obserwacji wielu badaczy, należy jednoznacznie stwierdzić, że „...nadrzędnym celem klimatyzacji sal operacyjnych jest minimalizacja ryzyka infekcji w trakcie operacji” [30].

Zdrowy mikroklimat nie tylko znacząco zmniejsza liczbę infekcji szpitalnych, ale także przyspiesza okres dochodzenia do zdrowia. Tym samym wpływa na skrócenie okresu rekonwalescencji pacjentów [31, 32]. Sprzyja zatem zmniejszaniu kosztów leczenia w coraz droższym dziś leczeniu [32]. Właśnie pod takim kątem powinny być prowadzone procesy projektowania, budowy, montażu oraz eksploatacji i konserwacji urządzeń klimatyzacyjnych i wentylacyjnych, przeznaczonych dla pomieszczeń szpitalnych [31]. Budujące jest, że pomimo obecnej słabej kondycji Służby Zdrowia w Polsce, sami lekarze dostrzegają potrzebę zapewnienia odpowiednich warunków mikroklimatu w pomieszczeniach bloków operacyjnych [33].

### 3.2 PARAMETRY MIKROKLIMATU

Na mikroklimat sal operacyjnych, jak i również innych pomieszczeń szpitalnych, składają się nie tylko odpowiednie warunki komfortu cieplnego, ale przede wszystkim stworzenie i zachowanie stref kontrolowanej czystości. Temu drugiemu czynnikowi mikroklimatu, poświęcono w przedkładanej pracy szczególną uwagę. Opis innych ważnych parametrów środowiskowych, takich jak: stopień i rodzaj jonizacji powietrza, zapach powietrza, temperatura promieniowania otaczających przegród budowlanych, poziom natężenia dźwięku, został świadomie pominięty z racji zbyt obszernej wtedy objętości pracy.

#### **3.2.1 Warunki komfortu cieplnego w salach operacyjnych**

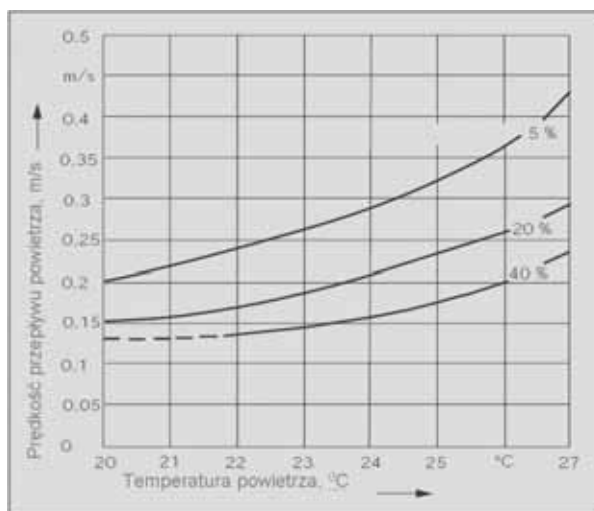
Do najistotniejszych parametrów mikroklimatu, które decydują o komforcie cieplnym, należą:

- temperatura powietrza wewnętrznego
- wilgotność względna powietrza wewnętrznego
- prędkość przepływu powietrza w sali

##### 3.2.1.1 Temperatura powietrza wewnętrznego

Do połowy lat trzydziestych ubiegłego wieku przyjmowano stosunkowo wysokie temperatury powietrza wewnątrz sal operacyjnych, jako korzystniejsze dla chorego [34]. W późniejszych latach stwierdzono, iż postępowanie takie nie jest słuszne, wobec faktu, że zabiegi przeprowadzane są w znieczuleniu ogólnym i odczucie zimna przez chorego praktycznie nie występuje. Znacznie ważniejsze jest natomiast zapewnienie optymalnych warunków pracy dla

personelu medycznego, w sensie stwarzanego mikroklimatu. Warunki pracy zespołu operującego w sali operacyjnej znacznie różnią się od warunków pracy w innych pomieszczeniach. Podczas operacji, ciało personelu operującego jest niemalże całkowicie zakryte a maski na twarzach utrudniają oddychanie i zwiększają wilgotność powietrza wdychanego [34]. Ponadto odzież operacyjną charakteryzuje się małą przewodnością cieplną (zwykle jest to  $\lambda = 0,23 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  dla produktów syntetycznych [35]). Czynniki te prowadzą do odczuwania temperatury powietrza jako wyższej niż jest ona w rzeczywistości. Dlatego też mikroklimat sal operacyjnych wymaga zapewnienia dużej zdolności chłodzącej środowiska.

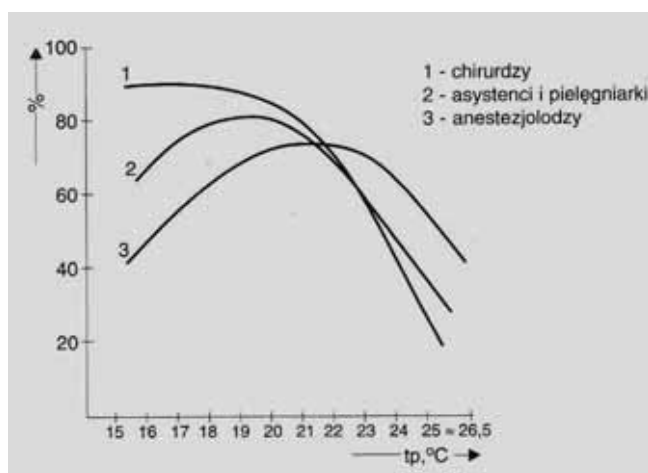


Rys. 1.10 Dopuszczalne prędkości przepływu powietrza w zależności od temperatury i stopnia turbulencji wg VDI 2083 [90]

Jest to zgodne z teorią głoszącą, że komfort cieplny zależy od równowagi cieplnej organizmu człowieka [36]. Termoregulacja organizmu zależy od: stopnia aktywności, oporu cieplnego odzieży oraz warunków termicznych w strefie przebywania ludzi, takich jak temperatura i wilgotność powietrza oraz prędkość przepływu powietrza w pomieszczeniu [35]. Na rys. 1.10 przedstawiono dopuszczalną prędkość przepływu powietrza w pomieszczeniu w zależności od temperatury i stopnia turbulencji powietrza (dla  $T_u$  w zakresie  $5 \div 40\%$ ) przy założeniu, że 15% osób może być niezadowolonych z takiego komfortu cieplnego [90]. Krzywe te uwzględniają stopień aktywności człowieka (met) i oporność cieplną odzieży (clo). Zobrazowano je dla warunków: 1,0met/1,4clo lub 1,2met/1,2clo [90]. Wykres (rys. 1.10) został sporządzony dla grupy ludzi pracujących w tym samym środowisku, o podobnej aktywności fizycznej. Nie oddaje jednakże w pełni problemu jaki w rzeczywistości występuje w salach operacyjnych. Chodzi o różne i przeciwstawne wymagania personelu operującego [30, 34, 37], który składa się z trzech zasadniczych grup:

- chirurgów,
- asystentów i pielęgniarek,
- anestezjologów.

Na *rys.1.11* zamieszczono wykres ilustrujący problem zróżnicowanych wymagań dotyczących temperatury powietrza wewnętrznego w sali operacyjnej [38]. Różnice w ocenie komfortu cieplnego wśród członków zespołu operującego, wynikają z różnego charakteru wykonywanej przez poszczególne grupy pracy. Najcięższą pracę, zarówno pod względem fizycznym oraz psychicznym wykonują chirurdzy [37]. Znajdują się ponadto w bezpośrednim sąsiedztwie lampy bezcieniowej, która stanowi najbardziej znaczące źródło ciepła



*Rys.1.11 Procentowy udział osób uznających temperaturę powietrza sali operacyjnej za komfortową z podziałem dla różnych grup pracujących w sali operacyjnej [38]*

występujące w salach operacyjnych. Temperatura powierzchni nowoczesnych lamp operacyjnych sięga nawet 50°C [39]. Lampa ta przekazuje ponadto ciepło na drodze promieniowania. Fakty te stanowią, iż chirurdzy wolą niską temperaturę powietrza w sali, rzędu 17 - 18°C [30]. W znacznie mniejszym stopniu oddziaływanie cieplne lampy bezcieniowej dotyka asystentów chirurgów i pielęgniarek. Ta grupa personelu wykonując lżejszą pracę (w porównaniu do chirurgów), za komfortową uznaje temperaturę powietrza nieco wyższą (o 0,6-1,5 K) [30]. Natomiast anestezjolodzy - na ogół oddaleni od lamp bezcieniowych - wymagają dla swojego komfortu cieplnego temperatury do 2,2-2,5 K wyższej niż chirurdzy [30]. Powyższe ustalono na podstawie badań prowadzonych w Wielkiej Brytanii [30].

Przyjęto ogólnie akceptowaną zasadę, że kryterium przy doborze temperatury powietrza dla sal operacyjnych stanowi dobre samopoczucie chirurgów, którzy mają największy wpływ na pomyślny przebieg operacji. Tak więc przyjęto temperatury powietrza w granicach 18-19 °C dla prędkości powietrza nie przekraczającej 0,2 m/s [30]. Pozostali pracownicy, dla których taka

temperatura jest zbyt niska, mogą ten stan zrekomensować poprzez cieplejszy ubiór [30, 37]. Dla większych prędkości powietrza przy nawiewach laminarnych małowymulowanych, rzędu 0,4-0,5 m/s, pożądana jest temperatura wyższa, zwykle o 2-3 °C [30].

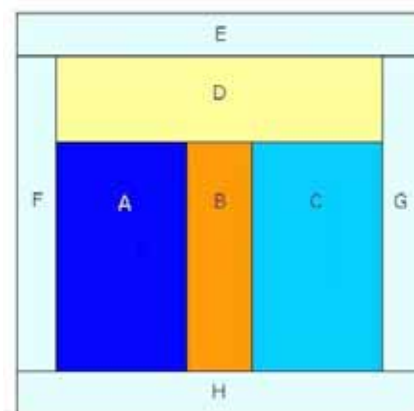
Badacze zagadnień komfortu cieplnego w salach operacyjnych proponują następujące wartości temperatur: *Bedford* (18 – 20°C), *Foster* (21 °C), *Piot* (20 – 21°C) [40].

W praktyce, w różnych krajach zaleca się różne temperatury powietrza w salach operacyjnych (zestawiono w *tab.1.2.*). Jednakże angielski badacz *Wyon* [40] wysunął teorię, że optymalna temperatura wewnętrzna jest zależna jedynie od wykonywanych przez personel czynności i stopnia napięcia psychicznego, a nie zależy od płci i rasy. W kontekście jego badań różnicowanie temperatur powietrza w różnych krajach nie ma uzasadnienia. Badania mające na celu określenie optymalnej temperatury w sali operacyjnej wykazały różne upodobania chirurgów w zależności od:

- wieku chirurgów (młodzi lekarze preferują niższe temperatury),
- czasu trwania operacji,
- pory roku,
- pomyślnego przebiegu operacji (gdy powstają komplikacje wskutek wzmożonego napięcia psychicznego oraz wysiłku fizycznego, chirurdzy wolą niższe temperatury) [40].

Ostatnio wzrosło przekonanie, że istotne jest utrzymywanie stałej temperatury ciała pacjenta podczas operacji. Wyziębienie sprzyja bowiem powikłaniom krążeniowym. Obecnie na odsłoniętą, nie operowaną część ciała kładzie się często materace elektryczne, podgrzewane do temperatury 40°C. Głoszone przez lata opinie sugerujące, że podczas operacji pacjentowi nie szkodzi niska temperatura powietrza, należą już do przeszłości [37].

Jak się wydaje jedynym rozwiązaniem w skali światowej, umożliwiającym ustalenie optymalnej temperatury wewnętrznej, która zapewniałaby odczucie komfortu wszystkim osobom przebywającym w sali operacyjnej, jest tzw. system 5-tej generacji [40a] firmy *HOWORTH AirTech* z Wlk. Brytanii. *AET-V4-UCA* (nazwa systemu) został zaprojektowany jako system modułowy z osobnymi strefami (*rys.1.11a*). Kształt i liczba stref może być kształtowana indywidualnie, w zależności od wymagań szpitala. System działający na zasadzie laminarnego wpływu powietrza przez poszczególne moduły stropu nawiewnego, umożliwia dobranie, a następnie utrzymywanie



*Rys.1.11a Koncepcja modułowego systemu AET-V4-UCA z wyodrębnieniem stref od A – H [40a]*

parametrów powietrza nawiewanego, indywidualnie dla każdej ze stref w obrębie pola operacyjnego. Nastawy wykonuje się przy użyciu panela sterującego (rys.1.11c). Możliwe jest także zróżnicowanie prędkości oraz wilgotności powietrza nawiewanego. Poza większym indywidualnym komfortem cieplnym, mniejsze jest zużycie energii i lepsza ochrona pola operacyjnego. Warunki mikroklimatyczne dla pacjenta (redukcja występowania problemu hipotermii), jak i dla operowanej rany są, optymalne. Rozwiązanie to, które łączy sprzyjające warunki gojenia rany oraz wysoką aseptykę, chronione jest patentem. Dzięki takiemu systemowi, chirurdzy mogą pracować w strefie o chłodnym i suchym powietrzu, pacjent może być utrzymywany w najbardziej korzystnych warunkach, a także anestezjolog może dopasować mikroklimat do swoich wymagań. Specjalna strefa peryferyjna wytworzona jest w celu utrzymania stabilności strumienia powietrza nawiewanego. Konsekwencją takiego działania jest, że chłodniejsze powietrze znajdujące się na obrzeżach strefy obsługującej pacjenta, ogranicza napływ cieplejszego powietrza i umożliwia pomimo wyższej temperatury dotarcie do poziomu stołu operacyjnego. Kilka pierwszych zastosowań takiego rozwiązania pojawiło się już w Skandynawii (rys.1.11b). [40a]



Rys.1.11b Modułowy strop laminarny w sali operacyjnej, typ AET-V4-UCA firmy Howorth AirTech [40a]



Rys.1.11c Panel sterujący modułowego systemu nawiewnego, firmy Howorth AirTech [40a]

W świetle najnowszych wytycznych europejskich, dotyczących m.in. wentylacji i klimatyzacji w szpitalnictwie (dyrektywa europejska SICC<sup>1</sup> - „Installations de chauffage et de ventilation dans les hôpitaux /planification, construction, exploitation/” z roku 2003 [100]) zakres temperatur optymalnych w obszarze krytycznym sali operacyjnej zawierać się ma w

<sup>1</sup> Dyrektywa SICC 99-3 powstała w roku 2002 za sprawą profesjonalnych organizacji trzech czołowych krajów europejskich zajmujących się higieną szpitalną, tj: DGKH – German Society for Hospital Hygiene, SGSH – Swiss Society for Hospital Hygiene oraz ÖGHMP – Austrian Society for Hygiene, Microbiology and Preventive Medicine Heating, Ventilation and Air-Conditioning Task Group [42, 43, 100, 101, 102] - przepisy te najprawdopodobniej wskazują drogę przyszłego rozwoju w dziedzinie klimatyzacji sal operacyjnych i mogą stanowić podstawę przyszłego standardu europejskiego [44, 107]

granicach od 18 do 24°C, a w oddziałach chirurgii dziecięcej nawet do 27°C [101]. W trakcie przeprowadzania operacji chirurgicznych wymagających wysokiej aseptyki, temperatura powietrza nawiewanego musi być zawsze przynajmniej 0,5 K niższa od temperatury panującej w strefie nawiewanego powietrza [102]. Oznacza to, że nawiewniki sufitowe stosowane w tego typu salach, nie mogą służyć celom pokrywania strat ciepła [102]. Obecnie za [102, 103] przyjmuje się dopuszczalną odchyłkę dla temperatury nawiewu od jej średniej  $\pm 1,0$  K. Układy klimatyzacyjne powinny stwarzać możliwość zmiany nastawy wartości temperatury powietrza przez personel medyczny w przytoczonym zakresie [102, 103], niezależnie od regulacji ogólnej związanej z temperaturą zewnętrzną i zyskami ciepła. Celowe byłoby stosowanie kasetek sterujących, umieszczanych na ścianie, przykładowo w pomieszczeniu ‘Przygotowania Lekarzy’, (zwykle przylegającym do sali operacyjnej), z możliwością regulacji temperatury w zakresie ( $\pm 3,0$  K). Wg wytycznych brytyjskich (*NHS*) [104] na panelu sterującym powinien być podgląd wskazujący aktualną temperaturę oraz wilgotność powietrza, uzyskiwanych w sali operacyjnej. W kontekście dyrektywy europejskiej *SICC 99-3* [100], w pozostałej części sali operacyjnej, niezależnie od wybranej (przez operatorów) temperatury powietrza w polu operacyjnym, powinna zachodzić możliwość utrzymywania temperatury powietrza w pomieszczeniu, nawet do 26°C (w okresie ciepłym) [101]. Amerykański Instytut Architektów (*AIA*) w swoich wytycznych z roku 2006 (*Guidelines for Design and Construction of Hospital and Healthare Facilities*) [105], podaje iż w celu uzyskania parametrów dot. wymaganej temperatury i wilgotności powietrza w pozostałej części sali (poza najważniejszym obszarem krytycznym, monitorowanym przy użyciu nawiewnika sufitowego), przewiduje się stosowanie dodatkowych nawiewników [41]. Cel ten osiągnięty może być również na drodze (w zależności od potrzeb) ogrzewania lub chłodzenia płaszczyznowego, tak proponują wspomniane wcześniej stowarzyszenia niemieckie, szwajcarskie i austriackie, w kolejności *DGKH*<sup>1</sup>, *SGSH*<sup>1</sup> oraz *ÖGHMP*<sup>1</sup> [101]. Według tych organizacji, zgodnie z koncepcją nowoczesnej klimatyzacji (*gentle air conditioning*), nawiewane powietrze ma zapewnić tylko wymianę powietrza w pomieszczeniu, natomiast nie ma już pełnić funkcji ogrzewania lub chłodzenia pomieszczeń [101]. W Polsce w kontekście ‘*Rozporządzenia Ministra Zdrowia w sprawie wymagań, jakim powinny odpowiadać pod względem fachowym i sanitarnym pomieszczenia i urządzenia zakładu opieki zdrowotnej*’ [106] (Dz. U. Nr 116, poz. 985) nie dopuszcza się ogrzewania sufitowego w pomieszczeniach szpitalnych.

W bieżącym roku na targach *SALMED`2006* w Poznaniu, zaprezentowano kompletną modułową salę operacyjną systemu *Cadolto* z pełnym wyposażeniem i instalacjami (*fol.1*). Posiadała m.in. klimatyzację, realizowaną za sprawą niskoturbulentnego nawiewnika sufitowego oraz właśnie ogrzewanie płaszczyznowe, zamontowane w ścianie modułu operacyjnego,

wykonane ze stali szlachetnej [45]. W jednym z wywiadów Hermann Bauer, zastępca dyrektora firmy *Cadolto*, stwierdził że stanowi to „przykład europejskiej sali operacyjnej przyszłości, w której konsekwentnie zastosowano założenia wytycznych *SWKI-99.3* [102] opisujących szczegółowo budowę sal operacyjnych” [45].



Fot.1 Modułowa sala operacyjna firmy *Cadolto*, prezentowana na targach *SALMED 2006* w Poznaniu [45]

### 3.2.1.2 Wilgotność względna powietrza

Wpływ wilgotności powietrza, w odróżnieniu do temperatury, na odczucie komfortu przez człowieka jest niewielki, ponieważ człowiek dobrze się czuje w szerokim ich zakresie. Reguły komfortu cieplnego dopuszczają wahania wilgotności w granicach 30 - 70 % bez wyraźnej zmiany odczucia komfortu. Specyfika pomieszczeń bloku operacyjnego wymaga jednak zawężenia zakresu wilgotności względnej powietrza klimatyzującego. Przy ustalaniu wilgotności względnej powietrza w sali operacyjnej należy wziąć pod uwagę strefę komfortu cieplnego wg *Fangera* [36]. Niektórzy autorzy (m.in. *Piot* [34]) twierdzą, że zespół operacyjny, a zwłaszcza chirurdzy opowiadają się za wilgotnością powietrza, nie przekraczającą 40%. Dla ograniczenia pocenia się (i jego nieprzyjemnych skutków [34]). Wg *SWKI-99.3* [102] maksymalna wilgotność względna nie powinna przekroczyć 50% [101]. Wilgotność w sali operacyjnej warunkowana jest ponadto procesami zachodzącymi w sali: zbyt duża wilgotność i wysoka temperatura sprzyjają rozwojowi i przeżywalności bakterii (bakterie najszybciej giną przy wilgotności względnej w zakresie 40-50% [30]). Wysoka wilgotność może także spowodować uszkodzenie aparatury, zaś zbyt niska, poniżej 40%, sprzyja powstawaniu elektryczności statycznej, co powoduje przyciąganie i utrzymywanie się pyłów [40]. W skrajnych przypadkach (przy zbyt suchym powietrzu) mikrowyładowania elektryczne mogą



doprowadzić nawet do zapłonu niektórych gazów anestetycznych (niebezpieczeństwo to jest całkowicie zażegnane przy wilgotności wyższej od 60% [30]).

W świetle powyższych rozważań Brytyjczycy zalecają w wytycznych HTM 2025 (NHS) [108] utrzymywanie wilgotności powietrza w sali operacyjnej w zakresie 50-60%. System automatycznej regulacji ma za zadanie tak sterować pracą nawilżacza powietrza, aby zapewnić w pomieszczeniu sali operacyjnej wilgotność równą 50% przy temperaturze wewnętrznej 20 °C (w okresie zimnym). Z kolei w okresie ciepłym odpowiedni spadek temperatury powietrza nawiewnego na chłodnicy, związany z osuszaniem powietrza, powinien umożliwić utrzymywanie wilgotności, co najwyżej 60% przy temperaturze wewnętrznej 20 °C. [108] Wymagane parametry powietrza dot. wilgotności względnej w wybranych krajach przedstawiono w *tab.1.2*.

### 3.2.1.3 Prędkość przepływu powietrza

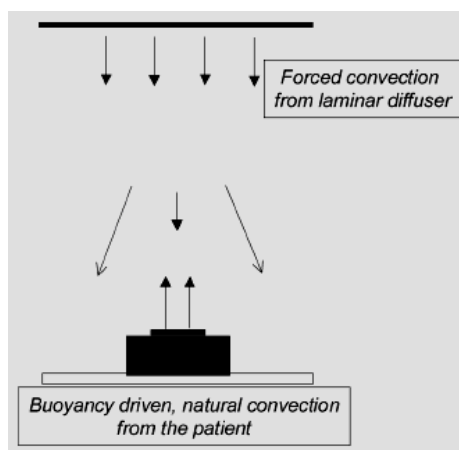
Przy rozpatrywaniu warunków komfortu cieplnego w ścisłym związku z temperaturą powietrza i temperaturą przegród otaczających jest prędkość strumienia powietrza wewnątrz pomieszczenia. Porowski i Szczechowiak [30] stwierdzają: „Jeżeli za cel główny postawimy jednak zachowanie sterylności pomieszczenia, praktycznie niemożliwe staje się dopasowanie tej prędkości do temperatury, ponieważ prędkość strumienia powietrza zależna jest od sposobu organizacji wymiany powietrza. Sposób ten jest podporządkowany zapewnieniu czystości powietrza, a nie spełnieniu warunków komfortu cieplnego.” Powietrze przepływające przez strefę przebywania ludzi nie może powodować u pacjenta i zespołu operacyjnego uczucia przeciągów. Dlatego konieczne jest skorelowanie temperatury z prędkością powietrza, wynikającą ze sposobu organizacji. Prędkości te, zależnie od sposobu nawiewu powietrza, mogą być zawarte w dość szerokim przedziale 0,1÷0,5 m/s [30]. Polskie „Wytyczne projektowania ...” [109] określają maksymalną prędkość powietrza w sali operacyjnej następująco:

- 0,4 - 0,5 m/s przy wporowym przepływie powietrza
- 0,15 - 0,25 m/s przy konwencjonalnym przepływie powietrza

Obecnie na podstawie najnowszych wytycznych szwajcarskich i niemieckich (SWKI 99.3 oraz VDI 2167) [102,103], wymagana minimalna średnia prędkość powietrza wypływającego z nawiewnika sufitowego określona została jako 0,24 m/s, przy czym w żadnym z punktów pomiarowych nie może spaść ona poniżej 0,20 m/s. Wymagania brytyjskie NHS zawarte w HTM 2025 z roku 1999 [108], podają iż minimalna prędkość powietrza, mierzona na wysokości 2,0 m powyżej poziomu posadzki ma wynosić: 0,30 m/s – dla pionowego nawiewu powietrza z kurtynami na obrzeżach nawiewnika, zakończonymi nie wyżej jak 1m nad posadzką; oraz 0,38

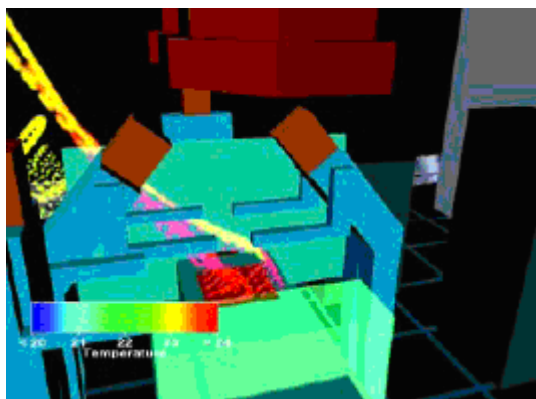
m/s z kurtynami zakończonymi nie wyżej jak 2,0 m nad posadzką; 0,40 m/s dla nawiewu poziomego, przy pomiarze wykonanym w odległości 1,0 m od czoła nawiewnika [108]. Podane prędkości dotyczą wartości średnich. Minimalna akceptowalna prędkość powietrza w dowolnym z punktów pomiarowych dla systemów pionowych, mierzona na wysokości 1 m nad posadzką ma wynosić 0,20 m/s [108].

Najnowsze odkrycia amerykańskich uczonych z *National Institute of Health (NIH)*, w szczególności badania pod kierownictwem *Memarzadeh`a* [46, 47], które stanowią podstawę do sformułowań zawartych w projekcie najnowszej normy amerykańskiej, dot. wentylacji w pomieszczeniach szpitalnych (*Standard 170p – Ventilation of Health Care Facilities* [110]), doprowadziły do zaskakujących wniosków. Norma ta zacznie obowiązywać w USA z końcem roku 2006. Stosując numeryczne metody modelowania przepływów w pomieszczeniu z zastosowaniem technik komputerowych CFD (computer fluids dynamics), *Memarzadeh* i jego zespół wykazał, iż wystarczającą prędkością wypływu powietrza z nawiewnika o charakterze laminarnym (z punktu widzenia minimalizacji ryzyka infekcji pooperacyjnych) jest prędkość w zakresie 0,13÷0,18 m/s (25÷35 fpm) [41, 110]. Intencją (uzasadnieniem) utrzymywania tak niskiej prędkości powietrza nawiewanego jest wykorzystanie efektu cieplnego do samoistnego usuwania zanieczyszczeń z powierzchni rany. Efekt ten - konwekcja naturalna (*thermal plume effect*) powoduje unoszenie się cząsteczek powietrza o temperaturze wyższej od temperatury otoczenia (*rys.1.12 i 1.13*) [47, 48]. Ciepłe cząstki powietrza wraz z zanieczyszczeniami mają naturalną tendencję unoszenia się na zewnątrz pola operowanego. Jeśli stosować będziemy niewłaściwy system wentylacyjny, możemy powodować osłabienie tego efektu, a nawet ponowne wtłaczanie mikroorganizmów do rany operowanego, twierdzi *Memarzadeh* [47, 48]. W ostatecznej fazie swoich badań, *Memarzadeh* przebadał 12 różnych systemów organizacji wymiany powietrza w salach operacyjnych i wskazał te najwłaściwsze.

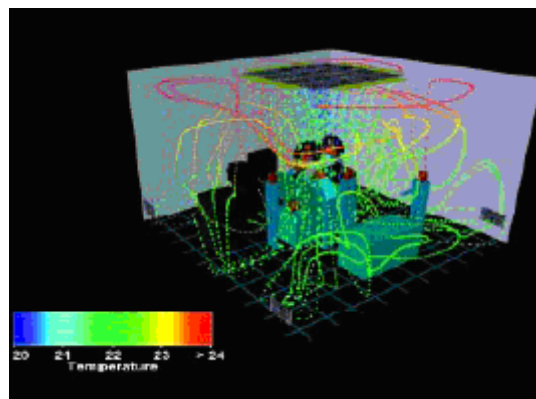


Rys.1.14 Dominujące siły powodujące ruch powietrza w obrębie operowanego pola [47]

W każdym z badanych przypadków określano liczbę cząsteczek zanieczyszczeń sedymentujących na ranie operowanego. Przeprowadzone badania to pierwsze przedsięwzięcie na taką skalę, dotyczące wpływu stosowanego rodzaju nawiewu powietrza do sali operacyjnej na ryzyko infekcji pooperacyjnych (SSIs). Przykładowy rozkład pól temperatur uzyskany w wyniku badań prowadzonych przez Memarzedeh `a zaprezentowano na rys. 1.14.



Rys. 1.13 Strumień powietrza ciepłego (thermal plume) unoszący się z pola operowanego [48]



Rys. 1.14 Rozkład pól temperatur w modelowej sali operacyjnej dla jednego z badanych przypadków [48]

W tabeli poniżej (tab. 1.2) zamieszczono zestawienie parametrów powietrza (opisanych w 3.2.) zalecanych dla sal operacyjnych przez wybrane normy i wytyczne.

Tab. 1.2 Wybrane parametry fizyczne i mikrobiologiczne powietrza w salach operacyjnych szpitali (oprac. własne na podstawie odpowiadających norm krajowych)

Kraj	USA	W. Brytania	Austria	Szwajcaria	Niemcy	Polska
Nazwa normy/wytycznych	ANSI/ASHRAE Standard 62.1	DHHS	ÖNORM H6020	SWKI Schriftenreihe Band 35	DIN 1946/4	-
Tytuł normy/wytycznych	Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality	.	Lüftungstechnische Anlagen in Krankenhäusern	Richtlinien für Bau, Betrieb und Überwachung von raumlufttechnischen Anlagen in Spitälern	Raumlufttechnik, Raumlufttechnische Anlagen in Krankenhäusern	Wytyczne Projektowania Szpitali Ogólnych, zeszyt 5
Rok wydania	2004	1986	1999	1987	1999	1984
Temp. powietrza	17÷27 °C	18-21 °C	21-26 °C	19-24 °C	22-26°C	22-25 °C
Wilgotność względna	45÷50%	40-60%	40-60%	45-60%	30-65%	55%
Maks. prędkość	-	0,25 m/s	-	0,25 - 0,45 m/s	0,18 - 0,22 m/s	0,2 - 0,5 m/s
Min. strumień powietrza wentylującego	25h <sup>-1</sup>	2340 m <sup>3</sup> /h 20 h <sup>-1</sup>	2400 m <sup>3</sup> /h	2000/3000 m <sup>3</sup> /h	2400 m <sup>3</sup> /h	12 ÷ 20 h <sup>-1</sup>
Min. ilość pow. zewnętrznego	5 h <sup>-1</sup>	2340 m <sup>3</sup> /h	1200 m <sup>3</sup> /h	800 m <sup>3</sup> /h	1200 m <sup>3</sup> /h	2400 m <sup>3</sup> /h s.wyp. 1200 m <sup>3</sup> /h s.konwencj.

### 3.2.2 Czystość powietrza

#### 3.2.2.1 Minimalny strumień powietrza zewnętrznego

Stosowanie układów otwartych związane jest ze znacznymi kosztami uzdatniania powietrza. Możliwe jest wprowadzenie częściowej recyrkulacji powietrza wentylującego, uzasadnione zastosowaniem filtrów absolutnych typu HEPA o wysokiej sprawności [30]. Zadaniem powietrza zewnętrznego dostarczanego do sali operacyjnej jest przede wszystkim rozcieńczenie stężenia gazów anestezyjnych do granicy toksykologicznie dopuszczalnej. W ostatnich latach zastosowanie szczelnych aparatów do anestezji zredukowało do minimum ilość wydzielających się gazów wybuchowych, co pozwoliło ograniczyć ilość powietrza świeżego [30]. Podane w (tab.1.2) przykładowe minimalne strumienie powietrza, choć dotyczą najczęściej systemów wyporowych, obliczone są jak dla wentylacji mieszającej. Nie powoduje to poważnych uchybień, ponieważ obszar działania nawiewników sufitowych pokrywa przede wszystkim, strefę wydzielania się gazów anestezyjnych.

Wg wytycznych brytyjskich (*NHS*) udział powietrza zewnętrznego powinien stanowić 20% powietrza wentylującego [104]. Normy szwajcarska (*SWKI 99.3* [102]) i austriacka (*ÖN 6020* [111]) jako minimalną ilość powietrza zewnętrznego dla sal operacyjnych podają 800 m<sup>3</sup>/h. Niemcy na podstawie *DIN 1946/4* [112] zalecają doprowadzać do sali minimum 1200 m<sup>3</sup>/h. Amerykańskie przepisy (*Std.62.1*) [113] minimalną ilość powietrza zewnętrznego określają na podstawie krotności i wynosić ma ona 5 h<sup>-1</sup> [49].

#### 3.2.2.2 Klasyfikacja czystości pyłowej

Ze względu na konieczność zapewnienia w salach operacyjnych wysokiej czystości powietrza, zalicza się je do pomieszczeń czystych i klasyfikuje m.in. w oparciu o ilościowe stężenie cząstek pyłu w powietrzu [44]. Choć klasyfikacja ta z punktu widzenia ryzyka wystąpienia zakażenia jest mniej istotna niż klasyfikacja mikrobiologiczna powietrza wewnętrznego, jest ona powszechnie stosowana w odniesieniu do pomieszczeń szpitalnych. Przez wiele lat najpełniejszym usystematyzowanym zbiorem wymagań, dot. czystości powietrza w pomieszczeniach była (jeszcze do niedawna) norma amerykańska *Fed. Std. 209d* [114], zastąpiona wersją „e” [115] w roku 1992. W tej ostatniej wprowadzono w odniesieniu do jej pierwotnej wersji, metryczny układ jednostek. Wymagało to wprowadzenia nowego nazewnictwa i rezygnacji z obowiązujących dotychczas symboli (symbole liczbowe od 1÷100 000 zastąpiono oznaczeniami „M” - metric, przyjmującymi wartość od 1÷7). W roku 1997 przyjęto standard międzynarodowy *ISO 14644-1: Cleanrooms and associated controlled environments* [116], dotyczący klasyfikacji pomieszczeń czystych. W krótkim okresie czasu

został on zaadoptowany przez wiele krajów, w tym również Polskę. W styczniu 2005 roku norma *PN EN ISO 14644-1: Pomieszczenia czyste i związane z nimi środowiska kontrolowane* [116] została zatwierdzona przez Prezesa Polskiego Komitetu Normalizacyjnego jako norma obowiązująca. Jest ona tłumaczeniem angielskiej normy europejskiej *EN 146144-1* z roku 1999. Norma definiuje pomieszczenia czyste jako obszar o ściśle kontrolowanym liczbowym stężeniu zanieczyszczeń znajdujących się w powietrzu. Klasyfikację pomieszczeń wg *PN EN ISO 14644-1* wraz z dopuszczalnymi ilościami zanieczyszczeń przedstawiono w *tab.1.3*. Tak samo jak w *Fed. Std 209* uwzględniono sposób użytkowania pomieszczenia czystego, definiując go jako: po zbudowaniu (*as-built* z ang.), po zainstalowaniu urządzeń (*at rest* z ang.) oraz podczas rutynowego użytkowania (*at operational* z ang.) [116]. W *tab.1.4* przedstawiono porównanie dawniej obowiązujących norm krajowych z aktualnie obowiązującą klasyfikacją *ISO*.

*Tab.1.3 Klasyfikacja pomieszczeń i obszarów czystych pod względem zawartości zanieczyszczeń pyłowych powietrza wg PN EN ISO 14644-1[117]*

Klasa	Maksymalna ilość cząstek w 1m <sup>3</sup> powietrza o średnicy równej lub większej od rozważanej wielkości (graniczne wartości określono na podstawie podanego w normie wzoru)					
	0, 1 μm	0, 2 μm	0, 3 μm	0, 5 μm	1 μm	5μm
ISO class 1	10	2	-	-	-	-
ISO class 2	100	24	10	4	-	-
ISO class 3	1000	237	102	35	8	-
ISO class 4	10 000	2 370	1 020	352	83	-
ISO class 5	100 000	23 700	10 200	3 520	832	29
ISO class 6	1 000 000	237 000	102 000	35 200	8 320	293
ISO class 7	-	-	-	352 000	83 200	2 930
ISO class 8	-	-	-	3 520 000	832 000	29 300
ISO class 9	-	-	-	35 200 000	8 320 000	293 000

*Tab.1.4 Porównanie klasyfikacji czystości pyłowej liczby pomieszczeń, zgodnie z normami krajów wymienionych w tabeli ; w lewej kolumnie podano maksymalne ilości cząstek o średnicy 0,5 μm dopuszczalne dla danej klasy (oprac. własne na podstawie 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122)*

Maks. ilość cząstek 0,5 μm/m <sup>3</sup>	Klasy pomieszczeń czystych, wg krajowych norm i wymagań							
	USA FS 209D	USA FS 209E	ISO 14644-1	Niemcy VDI 2083-3	Wlk. Bryt. BS-5295	Francja NF X44-101	Japonia B-9920	Australia AS-1386
	1988	1992	1997	1993	1989	1981	1989	1989
-	-	-	ISO 1	-	-	-	1	-
4	-	-	ISO 2	0	-	-	2	-
35	1	M 1,5	ISO 3	1	C	-	3	0.035
353	10	M 2,5	ISO 4	2	D	-	4	0.35
3 530	100	M 3,5	ISO 5	3	E, F	4,000	5	3.5
35 300	1000	M 4, 5	ISO 6	4	G, H	-	6	35
353 000	10 000	M 5,5	ISO 7	5	J	40,0000	7	350
3 530 000	100 000	M 6,5	ISO 8	6	K	4,000,000	8	3500
35 300 000	-	M 7,5	ISO 9	7	L	-	9	-

W zależności od szczegółowych wymagań dla pomieszczeń w bloku operacyjnym stosuje się trzy klasy czystości pyłowej: ISO klasa 5, ISO klasa 7, ISO klasa 8 (zgodnie z *PN EN ISO 14644-1:2004*) [117].

### 3.2.2.3 Klasyfikacja czystości mikrobiologicznej

Określenie klasy czystości mikrobiologicznej powietrza w pomieszczeniach czystych następnie przez identyfikację i pomiar ilościowy mikroorganizmów [30]. Drobnoustroje te są przenoszone zwykle na cząstkach kurzu i na wysuszonych wydzielinach [44]. W *tab.1.5* zestawiono wymagania, co do czystości mikrobiologicznej powietrza, te najbardziej znane i powszechnie stosowane nie tylko w krajach, z których pochodzą. Wszystkie klasyfikacje opierają się na zdefiniowanej, wymaganej koncentracji drobnoustrojów, określanej jako liczba kolonii mikroorganizmów w  $1\text{m}^3$  powietrza, która nie może być przekroczona. Jako kryterium podziału stosuje się jednostkę tworzącą kolonię bakteryjną, tj. JTK (CFU z ang. oraz KBE z niem.). JTK są to pyłki/drobiny/cząstki obłożone wieloma bakteriami/zarazkami. *"Wytyczne projektowania ..."* [109] (wprowadzone w Polsce do stosowania w 1984 roku przez Ministerstwo Zdrowia i Opieki Społecznej jako materiał pomocniczy obowiązujący przy projektowaniu szpitali nowych i zalecany przy podejmowaniu prac modernizacyjno-remontowych w szpitalach istniejących) proponuje zaliczać sale operacyjne do pomieszczeń I i II klasy czystości, zależnie od rodzaju przeprowadzanych zabiegów. Dopuszczalna koncentracja zanieczyszczeń (podana w *tab.1.5*) jest zwykle określona w rejonie pola operacyjnego (a zatem poza tym rejonem dopuszczalne jest utrzymywanie nieco większej koncentracji, nie przekraczających jednak wskaźników następnej klasy czystości).

*Tab.1.5 Zestawienie wymagań czystości mikrobiologicznej dla pomieszczeń szpitalnych w wybranych krajach [44]*

USA		Francja		Szwajcaria		Polska		Niemcy		
AAOS: 1981		AFNOR NF S 90-351		SKI-Guideline Band 35: 1987		- 1984		DIN 1946/4: 1999		
American Academy of Orthopedic Surgeon		Procédure de réception et de contrôle des salles d'opérations		Richtlinien für Bau, Betrieb und Überwachung von raumluftechnischen Anlagen in Spitalern		Wytyczne Projektowania Szpitali Ogólnych, zeszyt 5		Raumluftechnik, Raumluftechnische Anlagen in Krankenhäusern		
Nazwa klasy	CFU/m <sup>3</sup>	Nazwa klasy	CFU/m <sup>3</sup>	Nazwa klasy	KBE/m <sup>3</sup>	Nazwa klasy	JTK/m <sup>3</sup>	Nazwa klasy	Wartość dopuszcz alna	Wartość graniczna
1	35	B5	5	I	<10	I	70	I	4	10
5	175	B20	20	II	50÷200	II	300			
20	700	B100	100	III	200÷500	III	700			

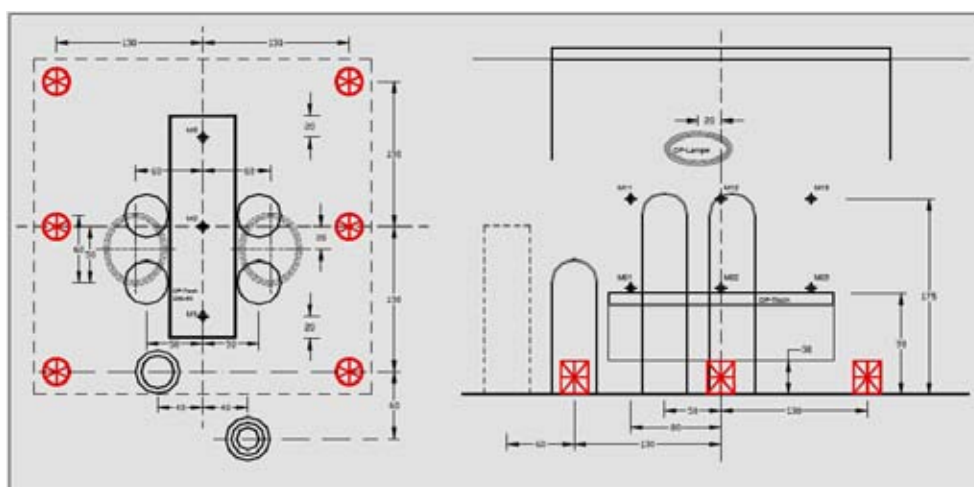
Porównanie pomiędzy sobą poszczególnych klas czystości pod kątem wymagań mikrobiologicznych jest wyjątkowo trudne. Często dotyczą różnych warunków pomiarowych (rozmieszczenia punktów pomiarowych, czasu wykonywania pomiarów, – czy podczas przeprowadzanych zabiegów, czy też po zakończonej dezynfekcji sali, czy podczas kontroli czystości). Ponadto używanie pomiaru liczby jednostek tworzących kolonie bakterii (*KBE*) nie jest zbyt dobrym wskaźnikiem, który pozwoliłby na ocenę jakości zastosowanej instalacji wentylacyjnej (*KBE* mają rozmiary rzędu  $15\mu\text{m}$ , podczas gdy same bakterie od  $3\div 8\mu\text{m}$ ) [50]. Stwierdzenie to potwierdza sam fakt, iż klasyfikacja dot. zanieczyszczeń mikrobiologicznych nigdy nie została określona np. standardem *ISO*, tak jak stało się to w przypadku zanieczyszczeń pyłowych. Obecnie prowadzone są działania mające na celu ujednoczenie wymagań w tym zakresie. Powołana została grupa robocza nr 13 – *Ventilation in Hospitals*, której celem jest opracowanie europejskich wytycznych (*CEN- Ventilation for buildings*) bazujących na informacjach zawartych w *SWKI/VDI* [43]. Komitet zawiązany dla opracowania nowych przepisów, dotyczących wentylacji w szpitalnictwie w Szwajcarii i Niemczech (*SWKI 99-3 i VDI 2167-1*), już stwierdził [43], iż w przyszłości nie powinno się w dalszym ciągu stosować pomiaru koncentracji zawieszonych w powietrzu mikroorganizmów jako kryterium oceny poprawności pracy instalacji klimatyzacyjnej w salach operacyjnych. Takie pomiary zalecane były dotychczas przy odbiorze oraz rutynowych kontrolach sal operacyjnych. Wymóg taki był zapisany w obowiązującej normie niemieckiej *DIN 1946-1* [112]. W wytycznych szwajcarskich - *SWKI 99-3: Richtlinie 99-3: Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage in Spitalbauten*, z 2003 r. [102] po raz pierwszy zrezygnowano z klasyfikacji pomieszczeń czystych opartej na dopuszczalnej liczby kolonii drobnoustrojów w powietrzu. Określono natomiast przedsięwzięcia techniczne prowadzące do zapewnienia odpowiednich warunków higienicznych dla trzech grup pomieszczeń. Pierwsza z grup obejmuje sale operacyjne i inne pomieszczenia przeznaczone do zabiegów chirurgicznych. Środki te dotyczą metody przygotowania i sposobu wprowadzenia powietrza do pomieszczenia i zostaną w dalszej części pracy przytoczone.

W wytycznych *SWKI 99-3 i VDI 2167-1* wprowadzono nowe pojęcie dot. czystości pomieszczeń, tj. „akceptację pod względem higienicznym” [43]. Wymagane są badania działania „efektu ochronnego” [43] danego systemu nawiewu powietrza, w znaczeniu ochrony obszaru krytycznego przed zanieczyszczeniami, podczas których określa się stężenie cząstek w obszarze chronionym  $C_X$ . W badanej sali rozpylany jest pył testowy o znanym stężeniu  $C_{\text{Ref}}$  z sześciu określonych punktów (*rys. 1.16*). Na podstawie zmierzonej koncentracji cząstek w ochronnej strefie, wyznacza się klasę ochrony  $SG_X$  ze wzoru 1.1 [43]. Klasy ochrony ( $SG_X$ ) określane są w skali od 5 (doskonała), poprzez 1 (umiarkowana) do 0 (brak efektu ochronnego).

$$SG_X = -\log(C_X/C_{Ref}) \quad (1.1)$$

gdzie:  $C_{Ref} = 10^6 \text{ P/ft}^3$

Przykładowo dla  $C_X = 950 \text{ P/ft}^3$ ,  $SG_X = 3,0$ . Klasa ochrony 4 powinna być osiągana w nowo powstałych salach operacyjnych przy nominalnym strumieniu powietrza nawiewanego. Nowa klasyfikacja nie powinna być stosowana do sal istniejących, poza przypadkami gdy w badanej sali uzyska się klasę ochrony 1 lub niższą. Wtedy to konieczna może być modernizacja instalacji klimatyzacyjnej [43]. Na *rys.1.15* przedstawiono schemat stanowiska pomiarowego podczas testów symulacyjnych ze ściśle określoną lokalizacją urządzeń i przyrządów pomiarowych, wymaganą do wyznaczania „efektu ochronnego” w badanej sali.



*Rys. 1.15 Schemat stanowiska sali operacyjnej do testów symulacyjnych (wyznaczania klasy ochrony badanego systemu na podstawie wyników pomiarów w punktach M1-M3); na czerwono zaznaczono miejsca emisji pyłu testowego; punkty M11 – M13 służą do określania parametrów komfortu [43]*



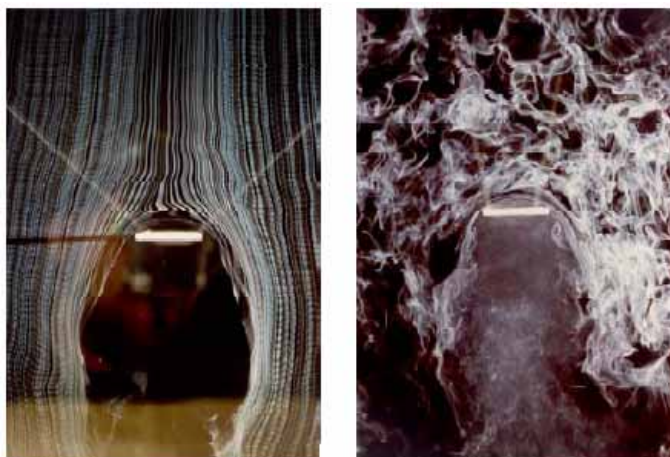
*Rys. 1.16 Zdjęcie przedstawiające pomiary prowadzone w jednej z sal operacyjnych szpitala Wetzikon w Szwajcarii, w celu wyznaczenia klasy ochrony zastosowanego systemu klimatyzacji [43]*



## 4. PRZEPIY W POWIETRZA W POMIESZCZENIACH CZYSTYCH

### 4.1 RODZAJE PRZEPIY W POWIETRZA

W pomieszczeniach czystych duże znaczenie ma nie tylko stopień czystości powietrza nawiewanego, ale także właściwy przepływ powietrza w pomieszczeniu [51]. Wysoka czystość powietrza nawiewanego jest warunkiem ‘a priori’ dla uzyskania pożądaney aseptyki w powietrzu sali operacyjnej. „Sposób przepływu i ilość powietrza decydują o skuteczności wentylacji w każdym pomieszczeniu, natomiast w pomieszczeniu czystym ma to szczególne znaczenie, gdyż decyduje o osiągnięciu i utrzymaniu w czasie eksploatacji odpowiedniej klasy czystości” [30]. „Na osiągnięcie i utrzymanie odpowiedniej klasy czystości w pomieszczeniu czystym znaczny wpływ ma charakter i stabilność przepływu powietrza w tym pomieszczeniu” [51]. Na rys.1.17 przedstawiono zachowanie się strumienia powietrza nawiewanego w wyniku napotkania na swej drodze przeszkody, dla dwóch rodzajów przepływu powietrza.



Rys.1.17 Rozbicie strumienia powietrza poprzez element zakłócający: przepływ laminarny (po lewej stronie), przepływ turbulentny (po prawej stronie) [52]

Ryzyko wystąpienia zakażenia związane jest nie tylko z czystością powietrza, ale również z elementami kształtującymi strugę powietrza nawiewanego [12]. Stąd w przedkładanej pracy zwrócono szczególną uwagę na właściwy dobór elementów nawiewnych w klimatyzacji sal operacyjnych. Właściwe jest takie ukształtowanie jądra strumienia powietrza nawiewanego, aby stanowił on warstwę ochronną dla osłanianego pola operacyjnego (obszaru krytycznego) [12]. Niestety, w wielu przypadkach systemy rozdziału powietrza powodują mieszanie sterylne go powietrza nawiewanego z powietrzem sali operacyjnej, i taką mieszaninę tłoczą w kierunku operowanego pola [12]. Ogranicza to uzyskanie warunków aseptycznych w obszarze stołu operacyjnego [57], a często nawet prowadzi do ich pogorszenia.

Wg ASHRAE wszystkie systemy rozdziału powietrza w pomieszczeniach dają się zaliczyć do trzech podstawowych rodzajów: wentylacji mieszającej (*mixing systems*),

wentylacji wyporowej (*displacement ventilation*) oraz wentylacji lokalizującej (*localized ventilation*). W rzeczywistości można mówić o wentylacji zbliżonej do modelu mieszającego lub wyporowego. Idealne wymieszanie występuje rzadko, a idealnym modelem wentylacji wyporowej, jest. tzw. wentylacja tłokowa [54].

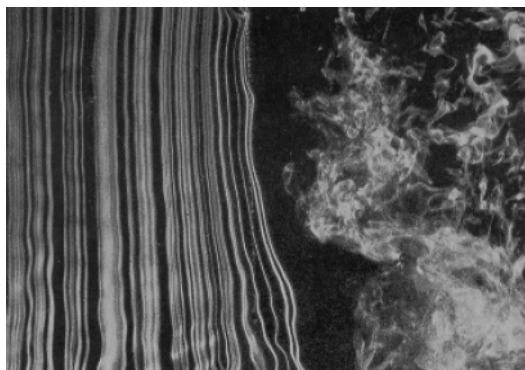
Sposoby przepływu powietrza w pomieszczeniach czystych (w tym salach operacyjnych) uzyskiwane poprzez wypływ powietrza z wielkiej liczby dostępnych na rynku nawiewników, dają się najogólniej zakwalifikować do dwóch rodzajów [53]:

a) przepływu ukierunkowanego (tł. autor) - *unidirectional flow* [53] (opisywany jako przepływ w jednym kierunku, tworzony poprzez układ równoległych strug powietrza – formalnie zwany jest często przepływem laminarnym. Należy jednakże pamiętać, że jest to tylko idealny, pożądany model przepływu. W praktyce często mamy do czynienia z przepływem o zminimalizowanej turbulencji (przepływ niskoturbulentny). Idealny przepływ laminarny, uzyskany w warunkach laboratoryjnych, bez występujących przeszkód zakłócających równoległy układ bardzo drobnych strug powietrza, przedstawiono na rys.1.18.



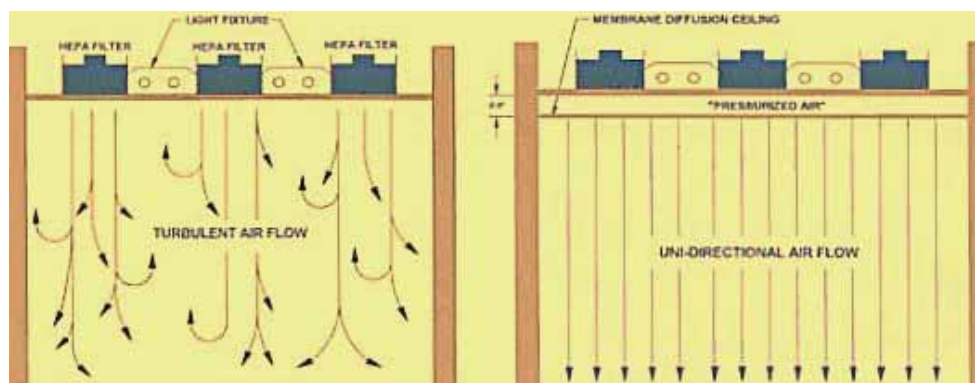
Rys.1.18 Układ strug w idealnym laminarnym strumieniu powietrza [55, 123]

b) przepływu nieukierunkowanego (tł. autor) - *nonunidirectional flow* [53] (opisywany jako przepływ o wielorakim charakterze, nie tworzony poprzez układ równoległych strug powietrza) określane mianem turbulentnego (po prawej stronie rys.1.19).



Rys. 1.19 Układ strug powietrza w laminarnym przepływie powietrza (po lewej stronie) i turbulentnym (po prawej) [56]

Pierwszemu z nich (a) odpowiadają systemy wentylacji wyporowej<sup>2</sup>, a drugiemu (b) systemy wentylacji mieszającej, opisywane zwykle jako systemy konwencjonalne<sup>2</sup>. Kryterium podziału dla stosowanych w salach operacyjnych systemów powietrza, stanowi charakter przepływu strumienia powietrza w pomieszczeniu [57]. Powyższe systemy rozdziału powietrza omówione zostały w sposób szczegółowy w rozdz.5. Na rys.1.20 zaprezentowano schematycznie, prowadzenie powietrza dla wspomnianych dwóch systemów.



Rys. 1.20 Schemat przepływu powietrza w przypadku zastosowania systemu konwencjonalnego (po lewej stronie) i systemu wyporowego (po prawej) [124]

## 4.2 MIARY DOSKONAŁOŚCI SYSTEMÓW ROZDZIAŁU POWIETRZA

### 4.2.1 Efektywność wentylacji

Sposób prowadzenia strumienia powietrza wpływa decydująco na rozkład koncentracji zanieczyszczeń w pomieszczeniu [35]. Miarą doskonałości systemu rozdziału powietrza w sali operacyjnej jest udział efektu wyporu, czyli stopień zbliżenia charakterystyki strumienia powietrza do strumienia wyporowego [59]. Może on być ilościowo określony, przykładowo

<sup>2</sup> Terminy, które przyjęły się w języku polskim [58]

poprzez efektywność wentylacji (określenie ogólne) oraz stopień kontaminacji (określenie dot. sal operacyjnych).

Z definicji: *efektywność wentylacji pomieszczeń* – jest to stosunek różnicy temperatur między powietrzem wywiewanym i nawiewanym do różnicy temperatur między powietrzem w pomieszczeniu (średnia wartość w strefie przebywania ludzi) i powietrzem nawiewanym [54].

$$K_t = \frac{t_u - t_n}{t_p - t_n} \quad (1.2)$$

gdzie:

$K_t$  – temperaturowa efektywność wentylacji,

$t_n$  – temperatura powietrza nawiewanego do pomieszczenia,  $^{\circ}C$

$t_u$  – temperatura powietrza usuwanego z pomieszczenia,  $^{\circ}C$

$t_p$  – średnia temperatura powietrza w strefie przebywania ludzi,  $^{\circ}C$

Można także podać analogiczną zależność na efektywność wentylacji w zakresie usuwania zanieczyszczeń [54].

$$K_z = \frac{k_u}{k_p} \quad (1.3)$$

gdzie:

$K_z$  – efektywność wentylacji w zakresie usuwania zanieczyszczeń

$k_u$  – koncentracja zanieczyszczeń w powietrzu wywiewanym z pomieszczenia,

$k_p$  – koncentracja zanieczyszczeń w strefie przebywania ludzi,

W modelu wentylacji mieszającej (przy idealnym wymieszaniu) obie efektywności dążą do jedności ( $t_u = t_p$ ) i ( $k_u = k_p$ ). W idealnym modelu wentylacji wyporowej, przy założeniu bezpośredniego nawiewu do strefy przebywania ludzi, temperaturowa efektywność wentylacji teoretycznie dąży do nieskończoności ( $t_n = t_p$ ). Jednakże w praktyce wskutek pewnej zwłoki w rozprzestrzenianiu się zysków ciepła, osiąga ona wartości skończone, ale większe od jedności [54].

Odwrotnością dla pojęcia *efektywności wentylacji w zakresie usuwania zanieczyszczeń* jest stopień kontaminacji  $\mu_s$  definiowany jako [112]:

$$\mu_s = \frac{k_{Ss}}{k_{Rs}} \quad (1.4)$$

gdzie:

$k_{Ss}$  – średnia koncentracja mikroorganizmów w obszarze chronionym,

$k_{Rs}$  – średnia koncentracja mikroorganizmów w pomieszczeniu (w powietrzu wywiewanym),

Przy idealnym wymieszaniu, współczynnik  $\mu_S = 1,0$ ; przy występowaniu częściowego przepływu waporowego współczynnik  $\mu_S < 1,0$  [59].

#### 4.2.2 Skuteczność wentylacji

Za Recknaglem [60] „Skuteczność wentylacji powinna być oceniana pod względem jej zdolności do zastępowania starego powietrza w pomieszczeniu w strefie przebywania ludzi świeżym powietrzem zewnętrznym i odprowadzania substancji szkodliwych”.

Do dwóch zasadniczych celów skutecznej wentylacji należą [30]:

- maksymalna czystość w strefie roboczej – doprowadzone powietrze czyste (zawierające wymaganą ilość powietrza zewnętrznego) powinno zostać możliwie w całości doprowadzone do strefy roboczej pomieszczenia, tzn. nie powinien występować przepływ obejściowy poza tą strefą,
- hermetyzacja źródeł zanieczyszczeń – ze względu na usytuowanie źródeł emisji substancji szkodliwych w pomieszczeniu powietrze czyste należy doprowadzić w taki sposób, aby zanieczyszczenia trafiały jak najszybciej do strumienia powietrza usuwanego i w możliwie jak najmniejszej części do strefy roboczej.

#### 4.2.3 Sprawność wymiany powietrza

Czas przebywania powietrza w pomieszczeniu służy również do oceny jakości działania wentylacji. Wg Sandberga – w wypadku idealnego przepływu waporowego rzeczywisty przeciętny czas przebywania powietrza w pomieszczeniu jest równy nominalnej stałej czasowej, a ta stanowi odwrotność krotności wymian i jest najkrótszym z możliwych, przeciętnym czasem przebywania powietrza w pomieszczeniu. Czas przebywania powietrza w pomieszczeniu, równa się czasowi pomiędzy dostaniem się powietrza do pomieszczenia, a jego wylotem z pomieszczenia. [60]

$$\tau_n = \frac{1}{\psi} \cdot h \quad (1.5)$$

gdzie:

$\tau_n$  – nominalna stała czasowa,  $h$

$\psi$  – krotność wymian powietrza w pomieszczeniu,  $h^{-1}$

- przy przepływie waporowym

$$\tau_{r,v} = \tau_n \quad (1.6)$$

- dla całkowitego wymieszania, przyjęto że

$$\tau_{r,v} = 2 \cdot \tau_n \quad (1.7)$$

gdzie:

$\tau_n$  – nominalna stała czasowa,  $h$

$\tau_{r,v}$  – rzeczywista stała czasowa,  $h$

Przy całkowitym wymieszaniu się powietrza dopływającego do pomieszczenia przyjęto, że rzeczywisty przeciętny czas przebywania powietrza w pomieszczeniu jest dwukrotnie dłuższy. Tak więc dla wymiany powietrza w pomieszczeniu przepływ waporowy stanowi przypadek idealny, gdyż czas przebywania powietrza w pomieszczeniu jest najkrótszy. Im powietrze ‘młodsze’, tym jest ono świeższe, ponieważ nie domieszało się do niego jeszcze zbyt wiele substancji szkodliwych. Przez wiek powietrza należy rozumieć czas pomiędzy dostaniem się powietrza do pomieszczenia a jego dopływem do pewnego punktu ‘P’ [60]. W przypadku klimatyzacji sal operacyjnych, za punkt ‘P’ należałoby przyjąć dowolny punkt ze strefy krytycznej, czyli chronionego obszaru stołu operacyjnego.

Stosunek idealnego do rzeczywistego przeciętnego czasu przebywania powietrza w pomieszczeniu określa się za *Skaretem* [60] jako sprawność wymiany powietrza  $\eta_a$  (*air exchange efficiency*).

$$\eta_a = \frac{\tau_n}{\tau_{r,v}} \quad (1.8)$$

Sprawność ta osiąga następujące wartości:

- $\eta_a = 1$  dla idealnego przepływu waporowego
- $1 > \eta_a > 0,5$  dla rzeczywistego przepływu waporowego
- $\eta_a = 0,5$  dla przepływu mieszającego (całkowite wymieszanie)
- $0,5 > \eta_a > 1$  dla przepływu indukcyjnego

Indukcyjny przepływ powietrza, jest najmniej pożądany w klimatyzacji pomieszczeń czystych i powinien być ze wszech miar unikany [30].

#### 4.3 PRĘDKOŚĆ PRZEPLÝWU I TURBULENCJA POWIETRZA

Prędkość przepływu powietrza w pomieszczeniu czystym ma istotny wpływ na uzyskanie odpowiedniej klasy czystości i związana jest pośrednio z krotnością wymiany powietrza. Charakter przepływu powietrza w pomieszczeniu można określić w oparciu o następujące kryteria [30]:

- średnią prędkość przepływu powietrza,  $\bar{v}$

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i, \text{ m/s} \quad (1.8)$$

- odchylenie standardowe,  $s$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{v} - v_i)^2}{n-1}}, \text{ m/s} \quad (1.9)$$

- stopień turbulencji,  $T_u$

$$T_u = \frac{s}{\bar{v}} \cdot 100, \% \quad (1.10)$$

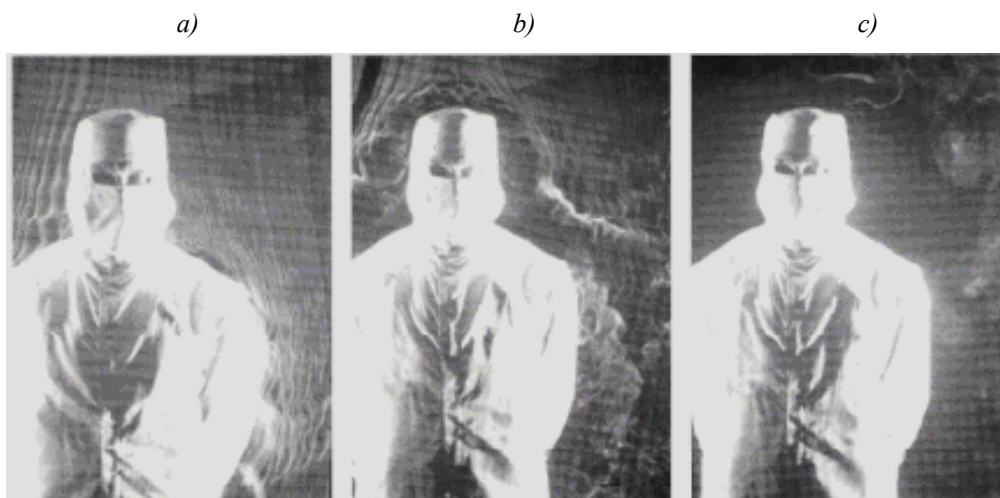
Podając za *Halupczokiem* [35] zależnie od wartości stopnia turbulencji, przepływ w pomieszczeniach czystych można podzielić na trzy grupy:

- wysoko-turbulentny (przepływ burzliwy) –  $T_u = 35 \div 60 \%$
- nisko-turbulentny (przepływ wporowy) –  $T_u = 10 \div 35 \%$
- mało-turbulentny (przepływ laminarny) –  $T_u = 0 \div 10 \%$

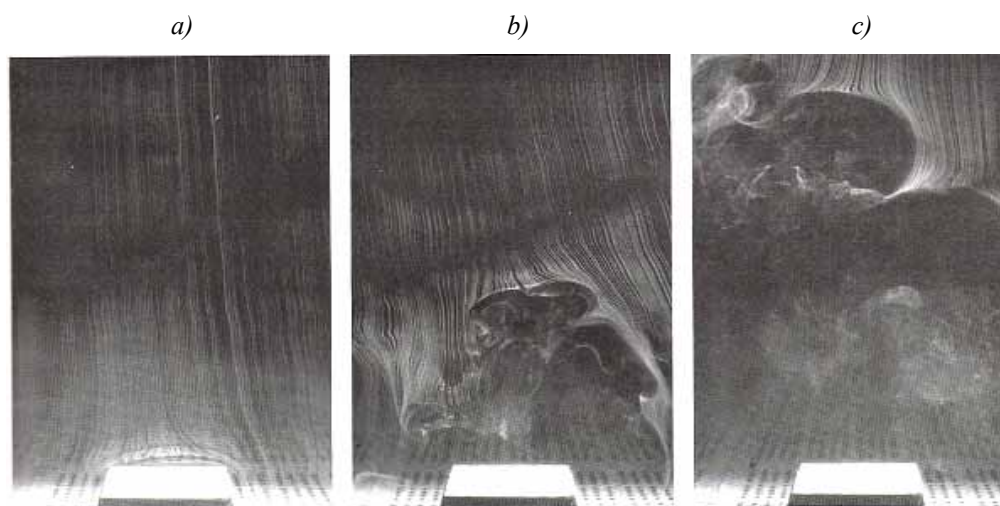
Wyniki badań *Scheer`a* [61] potwierdziły, że sedymentacja mikroorganizmów w przepływie tłokowym o  $T_u=20\%$  jest dwa razy większa niż w przepływie laminarnym o  $T_u=1\%$ . W nowej dyrektywie *SICC* [100] podaje się wartość  $T_u < 5 \%$  (dla przepływów niskoturbulentnych) jako konieczną do uzyskania, bezpośrednio pod nawiewnikiem laminarnym, w nowobudowanych salach operacyjnych [42, 43, 101].

Prędkość przepływu powietrza powinna być tak dobrana, aby wyeliminować zakłócenia powodowane obecnością osób i innych źródeł ciepła. Ma to istotny wpływ na zmniejszenie stopnia turbulencji powietrza w pomieszczeniu [30]. Jak wykazały badania [123], dopiero prędkość powietrza w pomieszczeniu 0,45 m/s powoduje wyeliminowanie zakłóceń od

personelu (rys.1.21) i innych źródeł ciepła (rys.1.22). Schmidt [62] tę samą prędkość powietrza podaje jako minimalną, niezbędną dla uzyskania przepływu laminarnego w sali operacyjnej.



Rys.1.21 Wpływ prędkości przepływu powietrza na układ strug w strumieniu laminarnym, opływającym osobę w ubiorze czystym, dla prędkości przepływu powietrza równych: a) 0,45 m/s; b) 0,33 m/s; c) 0,20 m/s [123]

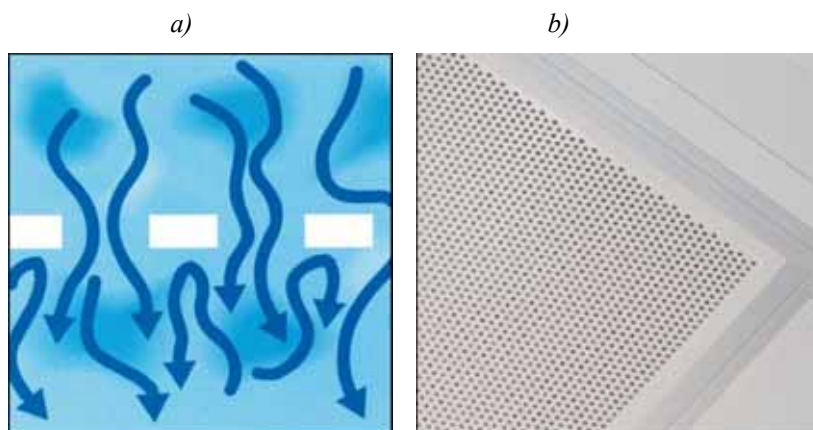


Rys.1.22 Wpływ źródła ciepła na zakłócenie przepływu powietrza dla różnych prędkości napływu, nad źródłem ciepła o mocy 1 kW : a) 0,45 m/s; b) 0,33 m/s; c) 0,20 m/s; widok układu strug w strumieniu laminarnym [123]

Badania przepływu powietrza z zastosowaniem wielko-powierzchniowych nawiewników dowodzą jednakże, iż także w przypadku wielu stropów nawiewnych występuje nierównomierność przepływu i stopień turbulencji dochodzi do kilkunastu procent (rys.1.23). Powodem tego jest rodzaj zastosowanego rozdzielacza powietrza w nawiewniku, najczęściej wykonany z blachy perforowanej (rys.1.23 a i b). Powoduje to rozbicie zwartej strugi powietrza nawiewanego (przeciskającego się przez otwory, zwykle o średnicy  $1,2 \div 2,0$  mm) na szereg strug cząstkowych i ich chaotyczny ruch burzliwy (indukcję powietrza z sąsiadujących strug

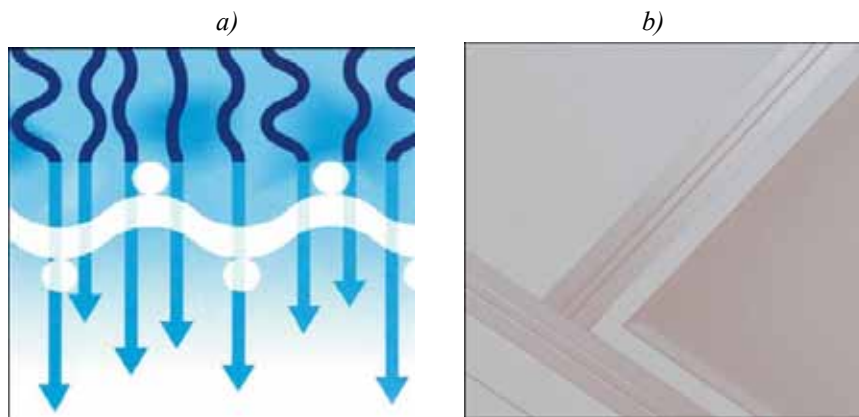


powietrza oraz zawirowania) oraz mieszanie powietrza nawiewanego z powietrzem znajdującym się w pomieszczeniu.



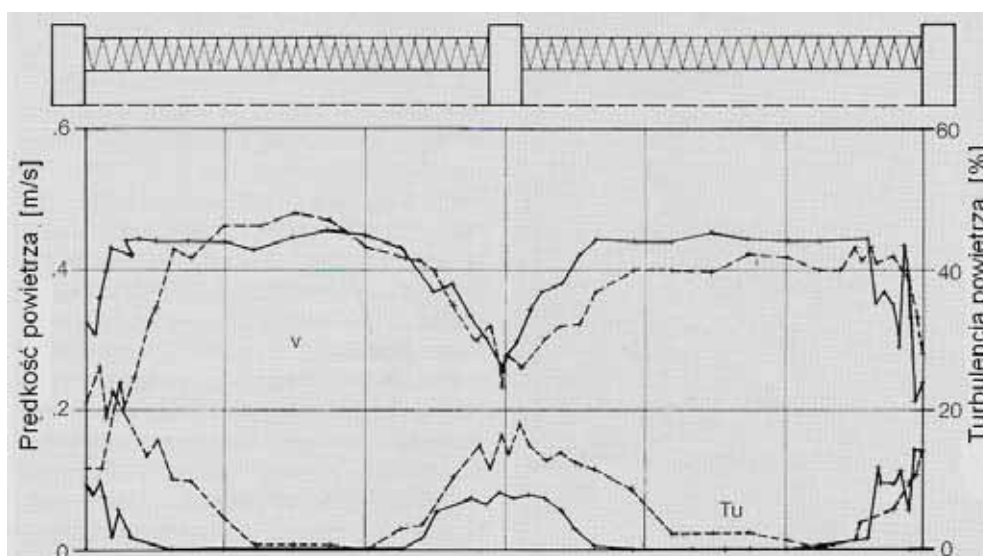
Rys. 1.23 a) Przepływ powietrza nawiewanego przez rozdzielacz (dystrybutor) powietrza wykonany z płyty perforowanej [124];  
b) odpowiadający temu przepływowi rozdzielacz, wykonany z płyty stalowej [125]

Strumień powietrza wypływający przez blachę perforowaną nazywa się strumieniem quasi-laminarnym lub nisko-turbulentnym [63]. W celu większego ustabilizowania przepływu stosuje się zamiast blachy perforowanej laminaryzatory (rozdzielacze) tkaninowe, zwykle są to materiały mikroporowe (rys. 1.24 a i b). Jednym z takich rozwiązań, chronionych patentem (*membrane diffusion® ceiling system*) [124] firmy LUWA CG jest poliestrowy materiał, wykonany w formie siatki, w której średnica jednego otworu nawiewnego ('oczka') wynosi ok. 60  $\mu\text{m}$ , a na 1  $\text{cm}^2$  powierzchni przypada około 6400 otworów nawiewnych. Strumień powietrza wypływającego z takiego rozdzielacza powietrza jest bardziej zbliżony do idealnego układu strug, charakterystycznego dla przepływów laminarnych. Stropy z materiałem mikroporowym stosowane są w salach o najwyższych wymaganiach czystości. Przy zastosowaniu laminaryzatorów tkaninowych najszybciej spada koncentracja zanieczyszczeń w obszarze krytycznym powietrza sali operacyjnej [64].

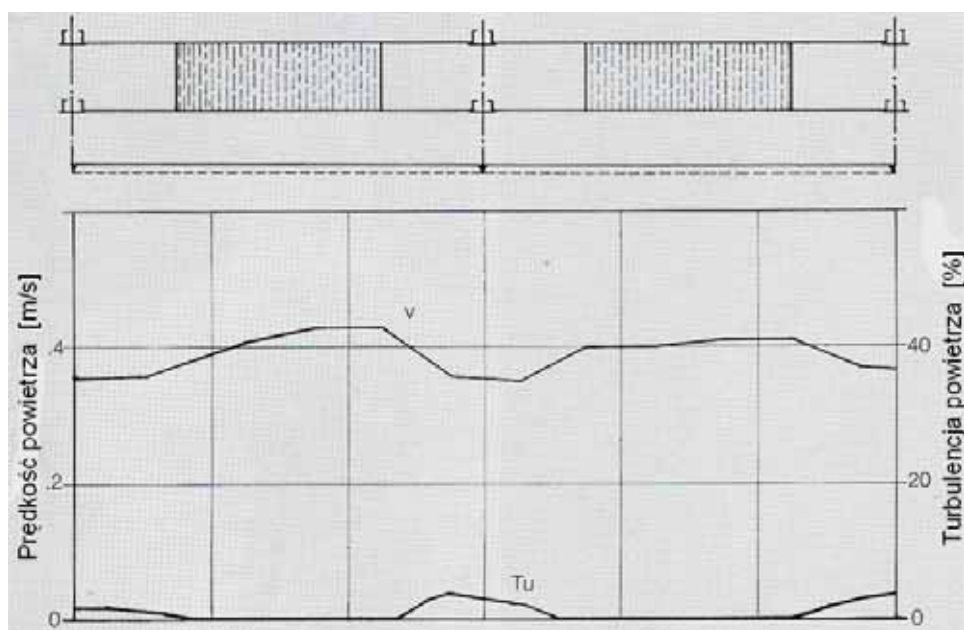


Rys. 1.24 a) Przepływ powietrza nawiewanego przez rozdzielacz (dystrybutor) powietrza wykonany z tkaniny poliestrowej [124];  
b) odpowiadający temu przepływowi rozdzielacz, wykonany z jednwarstwowego materiału poliestrowego [125]

Szereg firm stosuje własne rozwiązania konstrukcyjne. Na *rys.1.25* przedstawiono porównanie rozkładu pól temperatur i stopnia turbulencji powietrza wypływającego przez dwa rodzaje stropów laminarnych, zaś na *rys.1.26* - przez system sufitu nawiewnego firmy NICKEL, ze specjalnym laminaryzátorem na wypływie o grubości 4mm. Pozwoliło to na obniżenie stopnia turbulencji do 4% i na bardziej wyrównany wypływ powietrza poprzez płaszczyznę nawiewną [123]).



*Rys.1.25* Profil prędkości oraz stopień turbulencji dla powietrza wypływającego z dwóch wersji nawiewnika sufitowego: a) zakończony filtrem i osłoną z blachy perforowanej (linia przerywana) b) zakończony filtrem oraz materiałem mikroporowym (linia ciągła)  
Pomiar wykonano w odległości 1,5m od płaszczyzny wypływu powietrza [123]



*Rys.1.26* Profil prędkości oraz stopień turbulencji dla powietrza wypływającego z sufitu czystego wg firmy NICKEL; pomiar wykonano w odległości 1,0 m od płaszczyzny wypływu powietrza [123]

## 5. SYSTEMY ROZDZIAŁU POWIETRZA – PRZEGLĄD WYBRANYCH ROZWIĄZAŃ

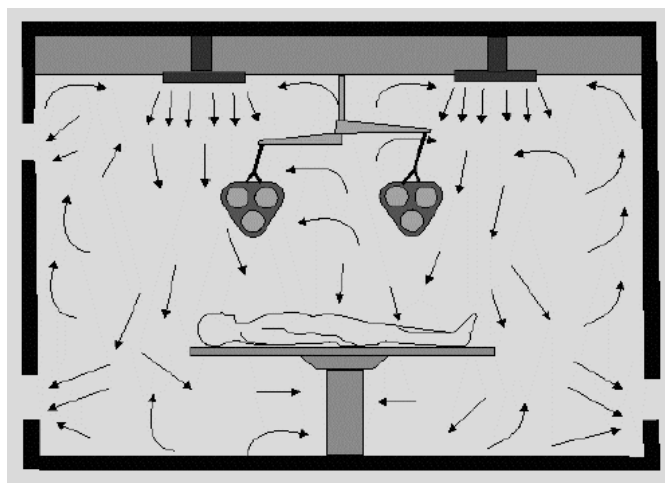
Rozwój nauk medycznych oraz technologii pomieszczeń czystych dla potrzeb służby zdrowia (bloki operacyjne), spowodował olbrzymie zmiany: od pierwszych wentylowanych sal szpitalnych w latach dwudziestych ubiegłego wieku, do nowoczesnych kabin operacyjnych o laminarnym przepływie powietrza.

### 5.1 SYSTEMY KONWENCJONALNE

Systemy konwencjonalne charakteryzują się burzliwością strumieni powietrza nawiewanego [57]. Turbulentny przepływu powietrza, zapewnia najczęściej całkowite wymieszanie powietrza wewnętrznego z czystym uzdatnionym powietrzem nawiewanym. Koncentracja cząstek zanieczyszczeń jest wyrównywana w całym pomieszczeniu. Wiążącą jest zasada, że koncentracja mikroorganizmów w pomieszczeniu jest odwrotnie proporcjonalna do strumienia powietrza nawiewanego [65]. Dla stałej nie zmieniającej się emisji mikroorganizmów w pomieszczeniu, ich koncentracja zależy tylko od wartości strumienia powietrza nawiewanego [34]. Przez intensywne mieszanie się sterylnej powietrza nawiewanego z powietrzem w pomieszczeniu osiąga się tzw. efekt homogennego rozcieńczenia zanieczyszczeń. Takie mieszanie umożliwia nawiewanie większej ilości powietrza bez powodowania przeciągów.

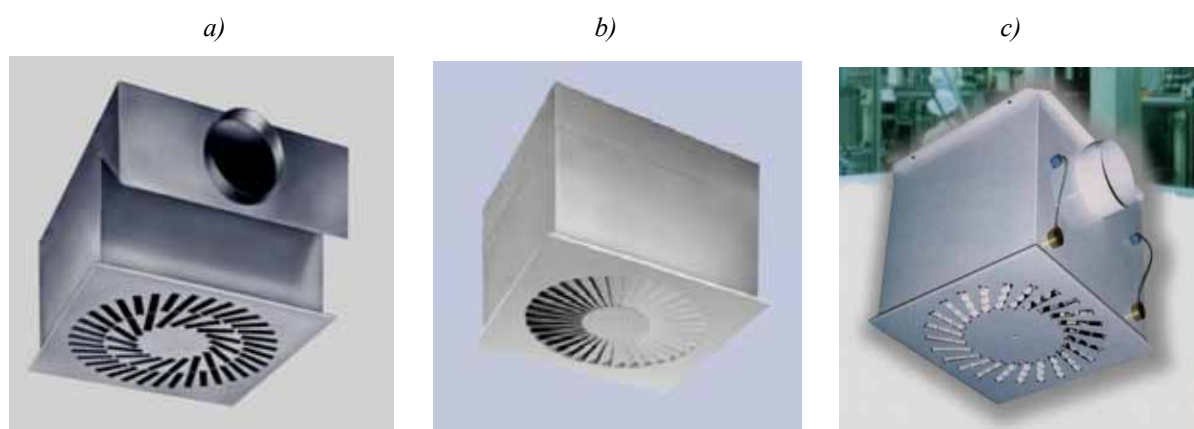
#### 5.1.1 Wentylacja mieszająca z zastosowaniem sufitowych nawiewników wirowych

Powietrze nawiewane jest zwykle poprzez pojedyncze nawiewniki sufitowe o wysokiej indukcji (rys. 1.28). Najczęściej stosuje się nawiewniki wirowe z filtrami absolutnymi H11-H13. Pod nawiewnikiem wirowym, wytwarzającym pod sufitem poziomy mocno zawirowany strumień powietrza (we wszystkich kierunkach – przepływ trójwymiarowy) powstaje strefa powietrza indukowanego, z ruchem powietrza z dołu do góry [66].

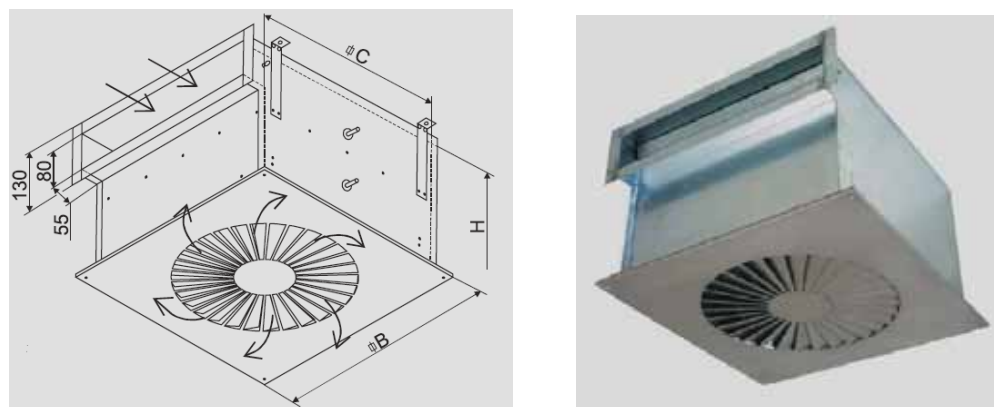


Rys. 1.28 Schemat rozdziału powietrza w sali operacyjnej z wykorzystaniem sufitowych nawiewników wirowych [62]

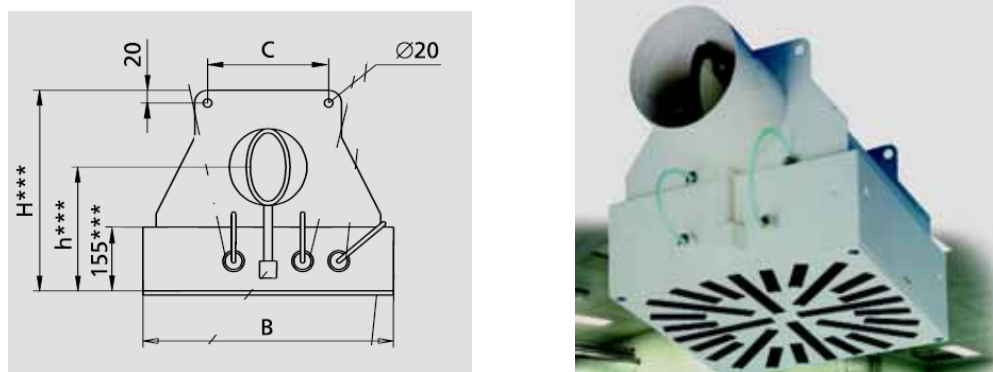
Nawiewniki wirowe oferowane są przez szereg firm, m.in. *TROX Technik*, *CLIMA TECH*, *KLIMOR*, *GEA* (rys.1.29 – 1.31). Typoszereg nawiewników jest zwykle dostosowany do typowych wielkości filtrów absolutnych. Dla nawiewników wirowych proponowanych jest wiele elementów wylotowych o zróżnicowanym kształcie i liczbie ukośnych szczelin nawiewnych. Możliwe są różne króćce dolotowe powietrza (prostokątne jak na rys.1.30, okrągłe jak na rys.1.29 a i c oraz rys. 1.31, umiejscowione z góry jak na rys.1.29b lub z boku). Nawiewniki te wykonane mogą być z blachy stalowej i pokryte farbą proszkową (odporną na środki dezynfekcyjne) lub ze stali nierdzewnej.



Rys.1.29 Sufitowy nawiewnik wirowy z filtrem absolutnym:  
 a) F 640 z elementem nawiewnym VDW 676x54 firmy TROX Technik [126]  
 b) F 660 z elementem nawiewnym FD firmy TROX Technik [126]  
 c) SFD firmy ClimaTech [127]



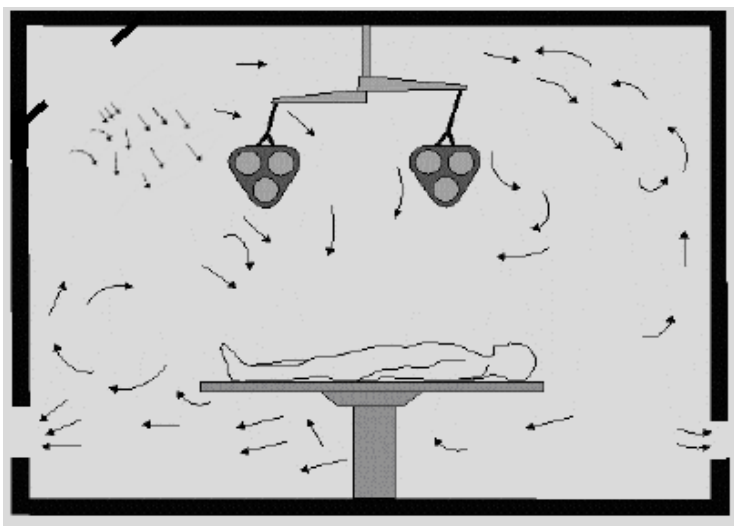
Rys.1.30 Sufitowy nawiewnik wirowy z filtrem absolutnym, typ NVF firmy KLIMOR w wykonaniu z blachy nierdzewnej [128]



Rys.1.31 Sufitowy nawiewnik wirowy z filtrem absolutnym, typ CGF-L firmy GEA Klimatyzacja [129]

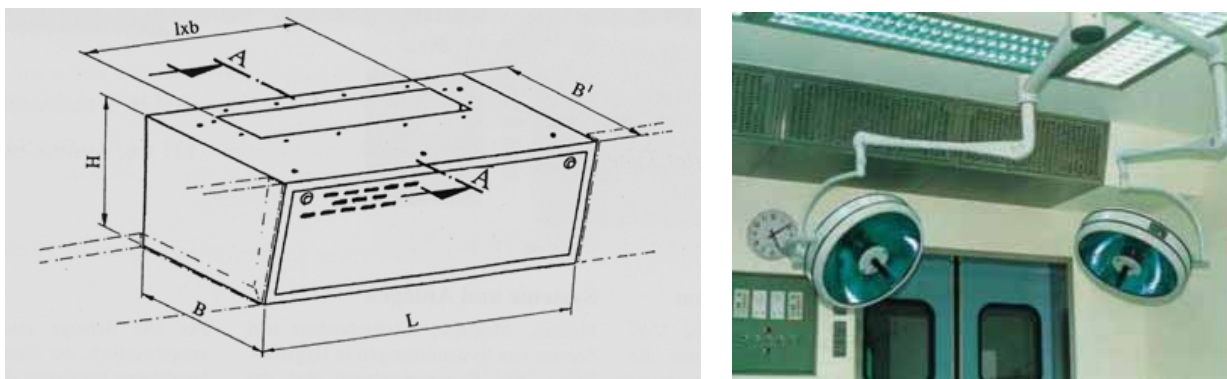
### 5.1.2 Wentylacja mieszająca z zastosowaniem ściennych nawiewników skośnych

Nawiewniki skośne stosowane są w salach operacyjnych, w których wysokość pomieszczenia lub konstrukcja sufitu nie pozwala na zastosowanie innych systemów nawiewu powietrza. Powietrze jest nawiewane od naroża ściany i sufitu w kierunku stołu operacyjnego, od strony nóg pacjenta. Na rys.1.32 przedstawiono rozdział powietrza w sali operacyjnej z zastosowaniem nawiewników skośnych. Przepływ powietrza w całej objętości sali, przedstawiony na schemacie jest przepływem mieszającym.

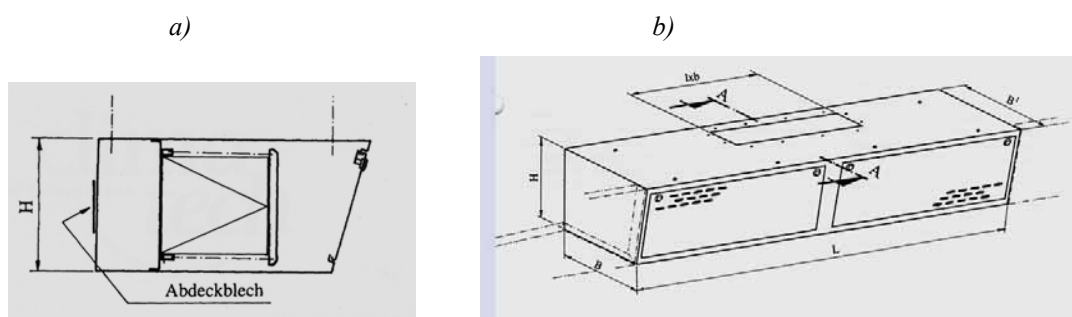


Rys.1.32 Schemat rozdziału powietrza w sali operacyjnej z wykorzystaniem narożnego nawiewnika skośnego [62]

Charakter wypływu powietrza z nawiewnika, uwarunkowany jest zastosowanym elementem wylotowym. Producenci nawiewników skośnych, uparcie oferują rastry nawiewne o konstrukcjach, wpływających na turbulentny charakter strugi nawiewnej. Przykładowo firma *CLIMA TECH* proponuje blachę perforowaną o dużych oczkach (rys.1.33 i rys.1.34). System działa więc na zasadzie nisko-turbulentnego nawiewu indukcyjnego.

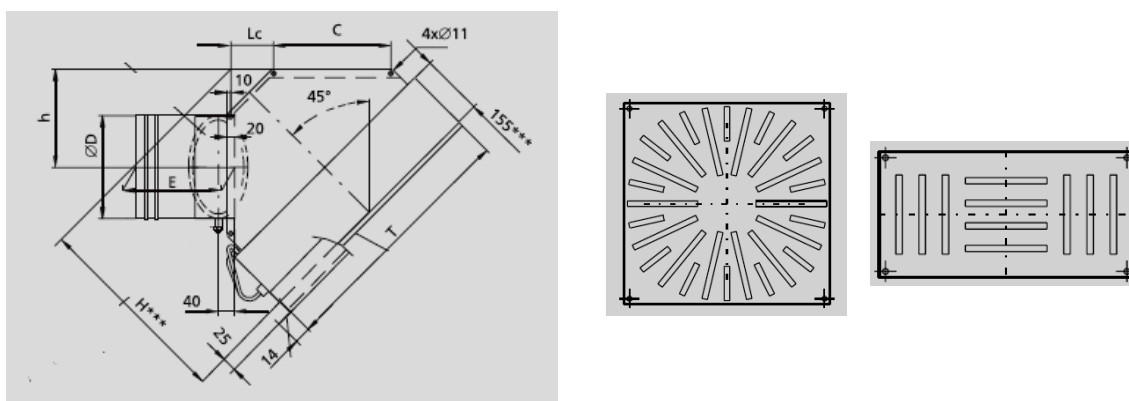


Rys.1.33 Nawiewnik skośny z filtrem absolutnym typ HA-5 o wymiarach 1080x410x720, firmy ClimaTech [130]



Rys.1.34 Nawiewnik skośny z filtrem absolutnym firmy ClimaTech [130];  
a) umiejscowienie filtra absolutnego w HA -5; b) typ HA -11 z elementem wlotowym od góry

Z kolei firma *GEA Klimatyzacja* proponuje płaszczyzny nawiewu takie same jak dla nawiewników sufitowych, (podobne jak dla nawiewników wirowych). Powoduje to wymuszenie wysokiej turbulencji powietrza wypływającego z nawiewnika (rys.1.35). Dotychczasowe rozwiązania nawiewników skośnych są przykładem systemu wentylacji mieszającej.



Rys.1.35 Nawiewnik skośny z filtrem absolutnym typ CGF-S firmy GEA Klimatyzacja - widok z boku wraz z proponowanymi elementami wylotowymi[129]

## 5.2 SYSTEMY WYPOROWE

Systemy waporowe charakteryzują się nikturbulentnym, zbliżonym do laminarnego, przepływem tłokowym (rys.1.36.) strumienia powietrza nawiewanego. Ich cechą jest eliminacja prądów konwekcyjnych i mieszania powietrza, tak iż do obszaru stołu operacyjnego dopływa nawiewane sterylne powietrze. W wyniku tego istnieje możliwość uzyskania wysokoaseptycznych warunków w obszarze pola operacyjnego [57]. Celem stosowania laminarnego nawiewu powietrza jest doprowadzenie czystego powietrza, o odpowiednich parametrach cieplno-wilgotnościowych oraz minimalnej turbulencji na miejsce powietrza zanieczyszczonego, wypieranego z obszaru krytycznego przez dopływające powietrze nawiewane [63].



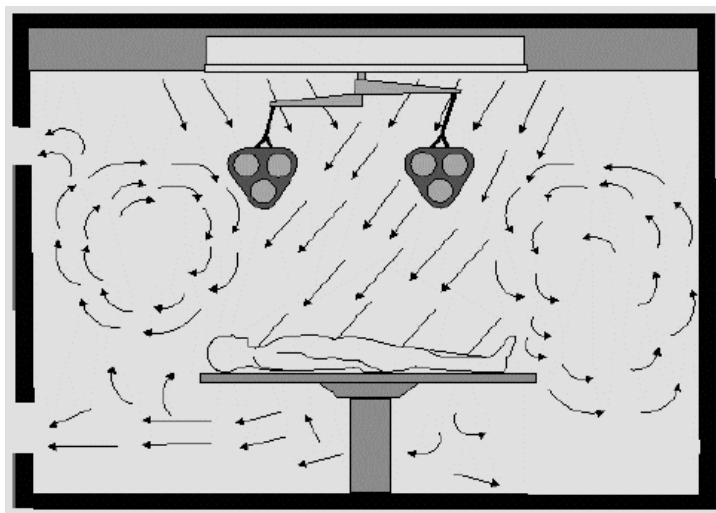
Rys.1.36 Laminarny idealny przepływ tłokowy powietrza wytworzony przez nawiewnik typu OP firmy NICKEL [56]

Istotnie ważne jest to, że laminarne systemy nawiewu powietrza mogą spełniać swoją funkcję tylko i wyłącznie, wówczas gdy temperatura powietrza nawiewanego jest niższa od temperatury powietrza w pomieszczeniu [67]. Stropy laminarne pracują prawidłowo jedynie podczas chłodzenia powietrza wewnętrznego [63]. System ten nie może być zatem używany do pokrywania strat ciepła sali operacyjnej (jeśli takie by wystąpiły). Z tego powodu każda z sal operacyjnych (w której istnieje prawdopodobieństwo pojawienia się ujemnego bilansu ciepła) wymaga dodatkowego ogrzewania dla uzyskania warunków komfortu cieplnego. Laminarny nawiew powietrza nie może być używany samodzielnie zarówno dla stwarzania komfortu cieplnego, jak i higienicznych warunków powietrza [67].

### 5.2.1 Systemy przejściowe

*Prof. Fitzner – zajmujący się badaniem laminarnych strug powietrza twierdzi iż: „(...) od przeszło 20 lat próbuje donosić o zaletach przepływu laminarnego w pomieszczeniach czystych, w tym również salach operacyjnych, jednakże z małym powodzeniem. Ludzie wciąż mają problemy ze zrozumieniem czym jest przepływ laminarny. Oczywiście w Niemczech i Szwajcarii rozwój stropów nawiewnych dla sal operacyjnych podąża w kierunku nawiewów*

wyporowych o niskiej turbulencji. [68]” Sufity, których wyloty stanowią dysze nawiewne lub blacha perforowana powodują mieszanie powietrza nawiewanego z powietrzem znajdującym się w pomieszczeniu [50]. Często mylnie nazywane są stropami laminarnymi, głównie przez firmy je produkujące. Przez większość autorów, poprawnie zaliczane do systemów konwencjonalnych, stanowiących ogniwo przejściowe do systemów wyporowych z przepływem laminarnym. Stosowane rozwiązanie jest następnym krokiem w kierunku zmniejszania koncentracji zanieczyszczeń [50], po rozwiązaniach omówionych w *rozdz.5.1* i kwalifikowane wg [50] do drugiego z trzech charakterystycznych przepływów powietrza w salach operacyjnych. Opisywane jest jako przepływ częściowo mieszający [50]. Eliminacja zanieczyszczeń występuje tutaj częściowo w wyniku „rozcieńczenia” powietrza w pomieszczeniu sterylnym powietrzem nawiewanym i częściowo przez „wypór” powietrza zanieczyszczonego przez powietrze nawiewane [57]. *Rys.1.37* przedstawia rozdział powietrza uzyskiwany w wyniku zastosowania klasycznego perforowanego stropu nawiewnego. Wiry powietrzne na zewnątrz pola nawiewu powodują mieszanie strumienia powietrza nawiewanego z powietrzem pomieszczenia, tak iż efekt wyporowy na poziomie stołu operacyjnego jest niewielki. Przy stosowanych prędkościach nawiewu rzędu 0,05-0,10 m/s strumień nawiewny pozostaje niestabilny. [30]

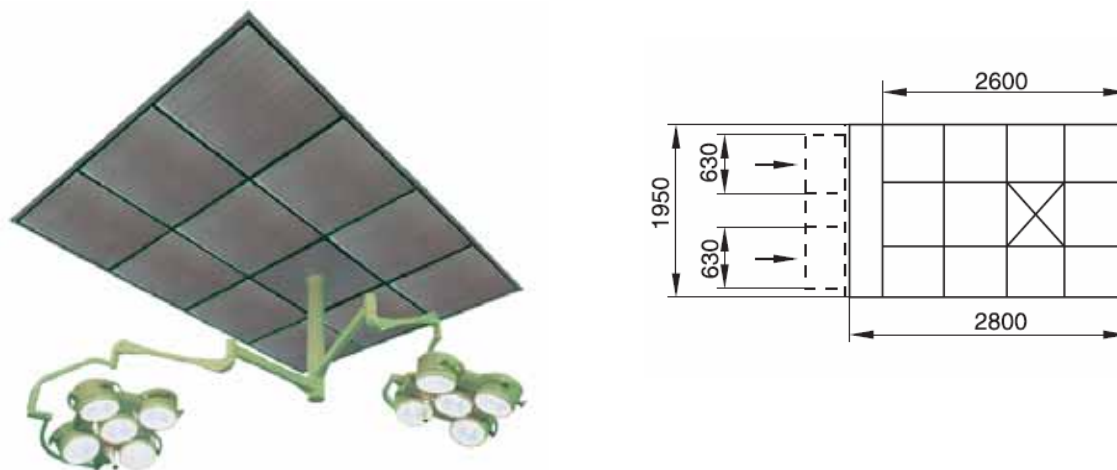


*Rys.1.37 Schemat rozdziału powietrza w sali operacyjnej z wykorzystaniem perforowanego stropu nawiewnego [62]*

Rozwiązanie to oferowane jest przez wiele firm (zarówno krajowych jak i zagranicznych) pod nazwą stropów nawiewnych z przepływem laminarnym dla sal operacyjnych, co jest oczywistym nadużyciem. Bliższe prawdy jest nazywanie tych stropów, mianem stropów nawiewnych z niskoturbulentnym przepływem wyporowym. Dla przykładu na *rys.1.38-1.40* przedstawiono zdjęcia stropowych nawiewników z blachą perforowaną jako płaszczyzną nawiewną, czołowych firm zajmujących się produkcją elementów nawiewnych do sal

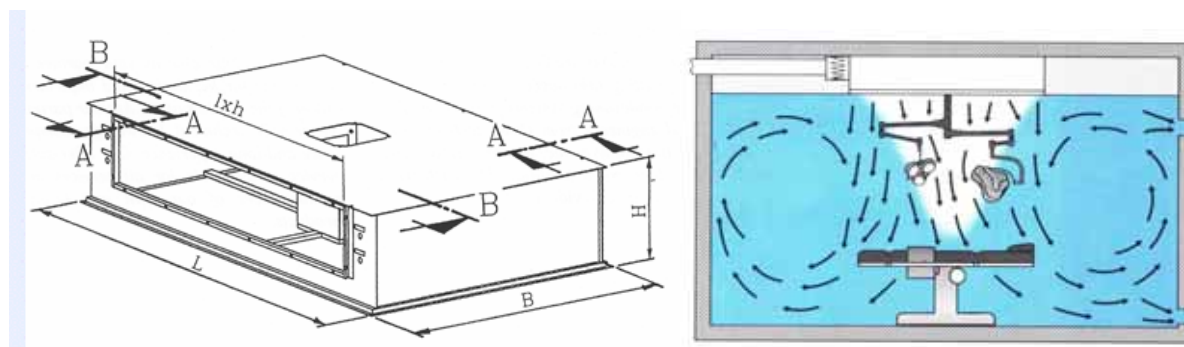


operacyjnych. Obudowa takiego nawiewnika najczęściej wykonana jest ze stali nierdzewnej, jako spawana, powietrznouszczelna skrzynia ciśnieniowa, której ścianki mają powierzchnie gładkie i odporne na środki dezynfekujące. Element nawiewny stanowią łatwo demontowane rastry nawiewne wykonane ze stali nierdzewnej. Standardowo w stropach przewiduje się jedno



Rys.1.38 Nawiewnik sufitowy z wypływem laminarnym, typ NSL3-4 firmy KLIMOR, z bocznym doprowadzeniem powietrza [131]

przejście dla kolumny lampy operacyjnej. Do obudowy podłączone są króćce przewodów wentylacyjnych. Możliwe są różne konfiguracje podłączeń: z boku (rys.1.38 i 1.39), z góry (rys.1.41). Filtry absolutne mogą znajdować się na całej powierzchni sufitu (rys.1.38) lub na kanale doprowadzającym powietrze do nawiewnika (rys.1.39). W stropach z płaszczyzną nawiewną wykonaną z blachy perforowanej, umieszczenie filtrów w kanale doprowadzającym (tak jak np. w stropach typu OP firmy CLIMA TECH, rys.1.39) ma istotny wpływ na nierównomierność wypływu powietrza z nawiewnika. Dzieje się tak w związku z małym oporem stawianym przez rastry nawiewne w płaszczyźnie nawiewu. Słuszne jest zatem umieszczenia filtrów absolutnych w płaszczyźnie nawiewnej stropów (np. KLIMOR, rys.1.38).



Rys.1.39 Strop nawiewny z przepływem laminarnym, typ OP firmy CLIMA TECH z umieszczeniem filtra absolutnego w bocznym kanale doprowadzającym [132]



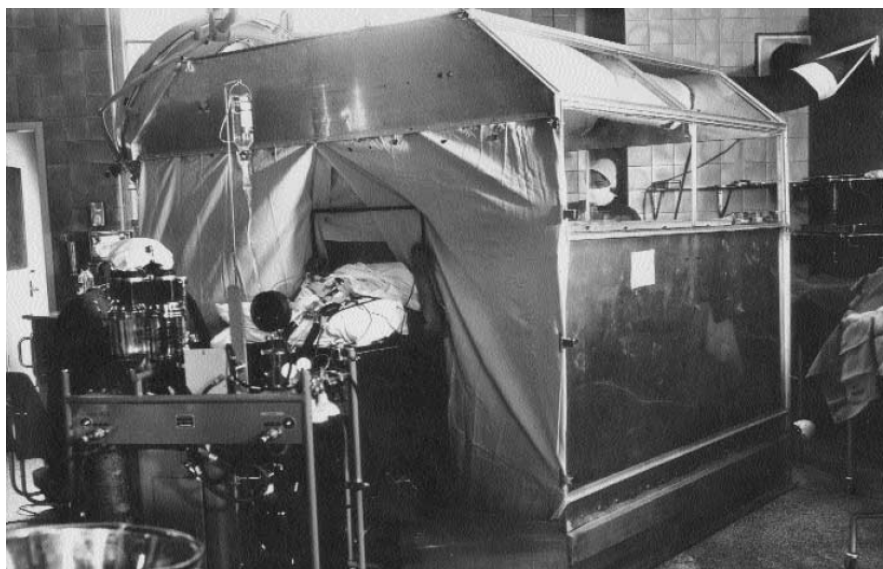
W stropach tych możliwe jest zastosowanie zintegrowanego oświetlenia (rys.1.42, rys.1.56).



Rys.1.42 Przykładowe usytuowanie opraw oświetleniowych firmy TRILUX w skrzyniach nawiewnych stropów laminarnych typu LAM firmy CLIMA TECH, przeznaczonych do zastosowania z rozdzielaczami tkaninowymi [135]

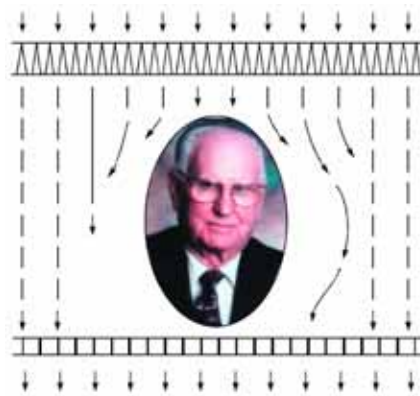
### 5.2.2 Sufitowe nawiewniki laminarne

W nowoczesnej higienie szpitalnej (jak stwierdzono w najnowszej dyrektywie szwajcarskiej *SICC 99-3* [100]), systemy klimatyzacji koncentrować się mają na ograniczonej, kontrolowanej strefie ochrony. Strefa ta ma obejmować obszar o wymiarach około 2,8x2,8 m gdzie znajdują się: stół operacyjny, stolik narzędziowy oraz zespół operacyjny [101]. Historycznie pierwszym systemem o kontrolowanej strefie czystości w sali operacyjnej było rozwiązanie zaproponowane na początku lat 60-tych przez brytyjskiego chirurga *J. Charnley`a* (1911-1982) [69]. Podejrzewał on, podobnie jak *Lister*, iż jakość powietrza wewnętrznego może mieć wpływ na powikłania pooperacyjne, z którymi często się spotykał w swojej pracy zawodowej. Skonstruował on prototyp kabiny operacyjnej, o powierzchni 7 ft<sup>2</sup> i 7 ft wysokości, która znana była pod nazwą „greenhouse” (rys.1.43). Była to zamknięta kabina, używana we wnętrzu sali operacyjnej, do której tłoczono było uprzednio filtrowane powietrze zewnętrzne.



Rys.1.43 Oryginalna kabina Charnley`a, tzw. „greenhouse”. Zdjęcie z roku 1962 pochodzące z Bolton, ówczesnej siedziby firmy Howorth Surgicair [69]

Na ten sam okres w historii przypada rozwój techniki pomieszczeń czystych oraz pionierskie badania nad laminarnym przepływem powietrza, prowadzone przez *Willis`a Whitfield`a* w Sandia Laboratories, Albuquerque w New Mexico w USA. Początkowe badania dotyczące możliwości ich aplikacji w przemyśle zbrojeniowym USA, szybko przyciągnęły uwagę środowiska medycznego. *Dr John G Whitcomb* był chirurgiem, który technologię pomieszczeń czystych przeniósł na sale operacyjne. Pierwsza na świecie sala operacyjna z pionowym laminarnym przepływem powietrza, została uruchomiona właśnie przez niego w roku 1966 (*rys.1.45*) [71]. Aby uniknąć niekorzystnych turbulencji przypodłogowych zaprojektował odprowadzenie powietrza z kabiny szeroką szczeliną przypodłogową, częściowo przysłoniętą, z elastycznie odginającą się pod naciskiem strumieni powietrza zasłoną z tworzywa sztucznego [30]. Krotność wymian powietrza w opisywanej kabinie wynosiła około  $600\text{ h}^{-1}$ . Sześć wentylatorów zapewniało prędkość wypływu powietrza równą  $90\text{ fpm}$  ( $0,46\text{ m/s}$ ) [71].



*Rys.1.44 Willis Whitfield – wynalazca nawiewu laminarnego na przełomie lat 50-tych i 60-tych XX w. [70]*



*Rys.1.45 Pierwsza w historii kabina operacyjna z zastosowaniem laminarnego przepływu powietrza [71]*

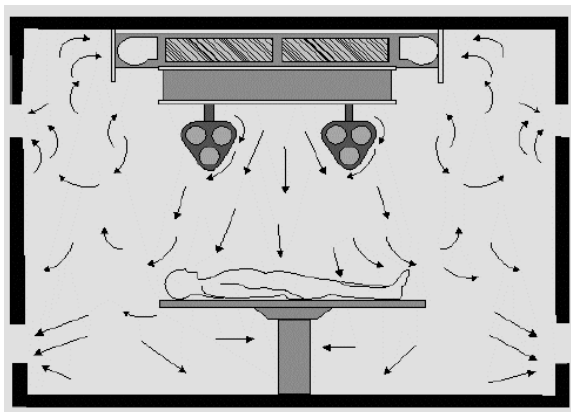
W Europie wdrożenie laminarnego sposobu nawiewu powietrza w salach operacyjnych przypisuje się wspomnianemu już chirurgowi - ortopedzie *Dr J. Charnley*. Na początku lat 60-tych podpatrzył rozwiązania wdrożone już przez *Whitcomb`a* w szpitalu *Baatan* [69]. Po powrocie do Wlk. Brytanii zastosował pozyskaną wiedzę we własnych rozwiązaniach, m.in.

wzbogacając swój 'greenhouse' o nawiew laminarny. W działaniach tych pomagał mu *F. N. Howorth*, który prowadził firmę zajmującą się produkcją filtrów powietrza. Kabiny takie były w użyciu od 1962 do 1966 r. W roku 1966 *Charnley* i *Howorth* wyprodukowali pierwszy seryjny nawiewnik do zastosowań w salach operacyjnych pod nazwą *Mark I* (rys.1.46). Zainstalowano go w szpitalu *Wrightington*. System ten znany jako system angielski, pod nazwą *Charnley* -

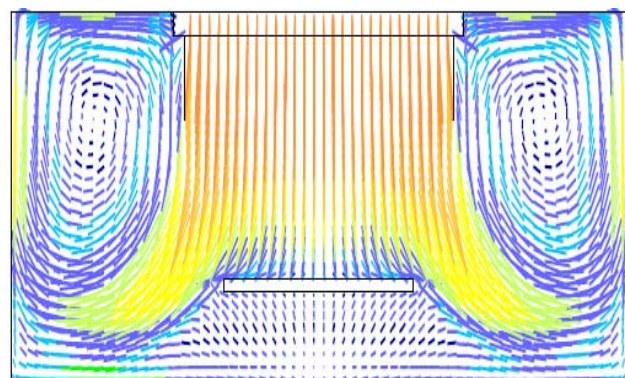


Rys.1.46 Nawiewnik laminarny 'Mark I' w sali szpitala *Wrightington*, *Howarth Air Engineering Ltd.* [69]

*Howorth*'a (rys.1.47) z pewnymi udoskonaleniami stosowany jest do dziś. Pożądany efekt wyporowy uzyskano poprzez zwiększoną prędkość powietrza nawiewanego do 0,5 m/s; Znaczny wzrost wymaganej ilości powietrza nawiewanego (ok. 10 000 m<sup>3</sup>/h) skłonił do zastosowania bocznych wentylatorów recyrkulacyjnych w stropie nawiewnym, które powodują odpowiednio ukierunkowany wymuszony przepływ powietrza w całej sali operacyjnej(rys.1.48)

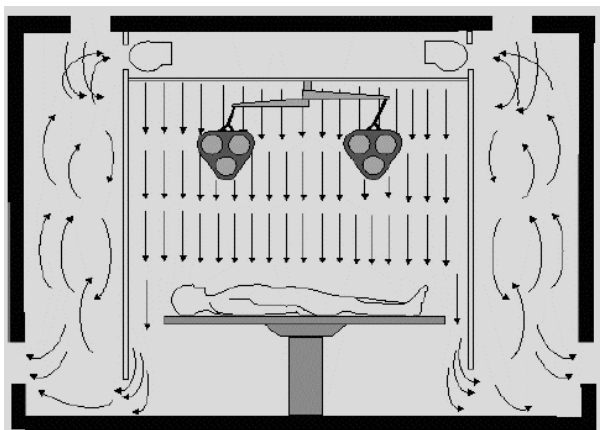


Rys.1.47 Schemat rozdziału powietrza w sali ooperacyjnej z zastosowaniem systemu *Charnley-Howarth*'a [62]



Rys.1.48 Wizualizacja rozprywu powietrza (CFD) dla systemu *Charnley-Howarth*'a, dla stropu typ *FOCUS 3000*, firmy *Health Pro Pty Ltd.* [136]

Od czasów Charnley-Howarth'a system LAF (*laminar air flow*) stał się preferowaną metodą dostarczania powietrza do sal operacyjnych. Systemy laminarne mają przewagę nad systemami turbulentnymi, przede wszystkim z powodu lepszej 'kontroli zanieczyszczeń'. Zastosowane boczne osłony (prawie do poziomu podłogi), dają ochronę przed zanieczyszczeniami ze środowiska otaczającego (rys.1.49 i rys.1.50). Główną wadą jest brak swobody w poruszaniu się zespołu operującego oraz procedury anestetyczne. Dlatego skrócono długość bocznych kurtyn.

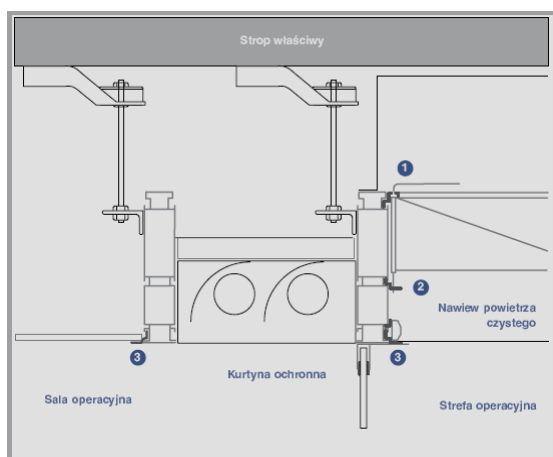


Rys.1.49 Schemat rozdziału powietrza w sali operacyjnej z zastosowaniem wydzielonej ultra czystej kabiny operacyjnej [62]



Rys.1.50 Zdjęcie przedstawiające współczesny 'greenhouse' - kabinę operacyjną (Enclosed Surgical Ventilation System) typ 'Lami-Gard™ System' amerykańskiej firmy Precision AirProducts Co. [137]

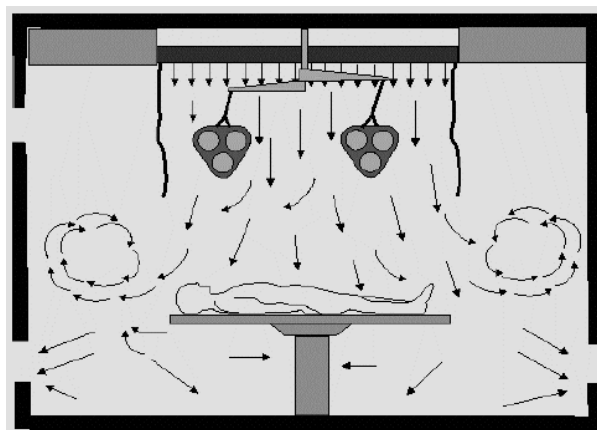
Zgodnie z najnowszymi wymaganiami europejskimi [100, 102, 103], wokół stropu nawiewnego (na jego obwodzie) należy montować kurtynę ochronną (fartuch) wykonaną ze szkła, pleksiglasu lub PCV o „długości przynajmniej 5 do 50cm” [101] (rys.1.53), celem ukierunkowania przepływu powietrza w stronę stołu operacyjnego [63]. Producenci oferują te same stropy w wersjach 'bez' i 'z' kurtynami ograniczającymi.



Rys.1.51 Szkic mocowania stropu laminarnego typu FFA.3 z kurtyną boczną firmy WEISS, do stropu właściwego [138]



Rys.1.52 Kurtyna ochronna w wykonaniu z PCV (po lewej stronie) oraz ze szkła wzmocnianego lub pleksiglasu (po prawej stronie) [138]



Rys.1.53 Schemat rozdziału powietrza w sali operacyjnej z wykorzystaniem stropowego nawiewnika laminarnego z bocznymi kurtynami ograniczającymi [62]

Stropy nawiewne z przepływem laminarnym mogą być ponadto wykonane jako prostokątne (rys.1.54), ośmiokątne (rys.1.55, rys.1.56), a nawet okrągłe (rys.1.57), jak na fotografiach poniżej.



Rys.1.54 Prostokątny strop laminarny typ FFA z bocznymi kurtynami ograniczającym, firmy ADMECO AG [139]



Rys.1.55 Ośmiokątny strop laminarny typ ULA z bocznymi kurtynami ograniczającym, firmy ADMECO AG [139]



Rys.1.56 Ośmiokątny strop laminarny typ ULA bez kurtyn ograniczających, firmy ADMECO AG [139]

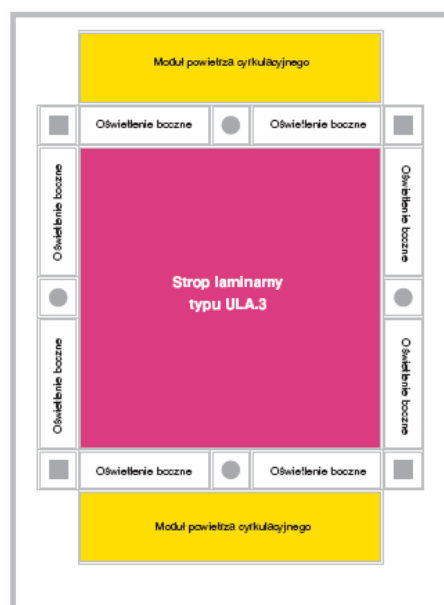


Rys.1.57 Okrągły strop laminarny typ OPTIMA CG bez kurtyn ograniczających, z wewnętrznym oświetleniem, firmy McLeod RUSSEL Filter GmbH [140]

Przytoczone uprzednio wymagania europejskie [100, 102, 103] określają: minimalne wymiary stropów jako 3,2 x 3,2 m, celem zapewnienia wymaganego obszaru sterylnego o wymiarach 2,8 x 2,8 m; zastosowane filtry powietrza muszą być o klasie H14; minimalna średnia prędkość wypływu powietrza ma wynosić 0,24 m/s; uzyskanie przepływu (unidirectional flow) o niskim stopniu turbulencji, poniżej 5% [43, 101]. Tak duże wymiary stropów (stropy wielkopowierzchniowe [72]) wymagają dużych ilości powietrza wentylacyjnego rzędu 8000 – 10000 m<sup>3</sup>/h. Obróbka i przetłaczanie takich ilości powietrza wymaga wysokich nakładów inwestycyjnych i podnosi koszty eksploatacji układu klimatyzacyjnego. Stąd w [100] pojawił się zapis o stosowaniu wydajnych stropów energetycznych, opartych na powietrzu recyrkulacyjnym. Podobnie, w dokumencie brytyjskim HTM 2025 [108] stwierdza się że: „ze względu na duże ilości powietrza doprowadzanego do stropu laminarnego (duża prędkość przepływu, duża powierzchnia stropu) zasadnicze znaczenia dla zminimalizowania kosztów eksploatacji ma zastosowanie recyrkulacji powietrza.” Przykładem stosowania się do powyższych zaleceń jest strop laminarny typ ULA.3 firmy WEISS (rys.1.58), gwarantujący bardzo dobre mieszanie powietrza cyrkulacyjnego oraz świeżego oraz równomierne rozprowadzenie powietrza w przestrzeni operacyjnej przy optymalnej prędkości nawiewu. Strop ten należy do nowej generacji stropów laminarnych dla sal operacyjnych. Instalowany jest wewnątrz przestrzeni stropu podwieszanego. W skład wchodzi: rozdzielacz powietrza, końcowe filtry HEPA, ciśnieniowa komora rozprężna ze stali nierdzewnej i dwa moduły powietrza cyrkulacyjnego (rys.1.59). Powietrze zasysane jest przez wloty w modułach cyrkulacyjnych i włączane jest do ciśnieniowej



Rys.1.58 Widok stropu z przepływem laminarnym, typ ULA.3 z kurtynami ograniczającymi z PCV, z bezpośrednią recyrkulacją z pomieszczenia, firmy WEISS [138]



Rys.1.59 Schemat instalacji stropu laminarnego, typ ULA.3 (widok z góry), firmy WEISS [138]



komory rozprężnej, mieszając się ze świeżym powietrzem dostarczanym kanałem z jednostki klimatyzacyjnej. Ta mieszanina jest następnie filtrowana (HEPA) i nawiewana do pomieszczenia, przy użyciu rozdzielacza (dystrybutora) do strefy operacyjnej. [138]. Ze względu na rygorystyczne wymagania Polskich Norm [141] w zakresie dopuszczalnego poziomu hałasu w salach operacyjnych, stosowanie powyżej opisanego rozwiązania jest praktycznie niemożliwe, a zwiększony poziom hałasu w związku ze stosowaniem stropów recyrkulacyjnych jest istotną ich wadą [72].

Uwarstwiony przepływ powietrza pod nawiewnikiem laminarnym zakłócany jest najczęściej, przez występujące na drodze przepływu bezcieniowe lampy operacyjne oraz kolumny anestetyczne. Podczas operacji ruchome ramiona kolumny wprowadza się i wyprowadza ze strefy ultraczystej, co powoduje możliwość przenoszenia cząstek zanieczyszczeń. Ostatnio zamiast tradycyjnych kolumn anestetycznych stosuje się, tzw. mosty zasilające (*rys.1.60*), w postaci stałych profili na obwodzie stropu nawiewnego [73]. Na (*rys.1.61*) przedstawiono przykładowe rozwiązanie, oferowane przez firmę *ADMECO* [139].



*Rys.1.60 Sekcja mostu mediów: system modułowy dostarczający gazy medyczne, próżnię, AGSS, zasilanie i przesył danych [138]*

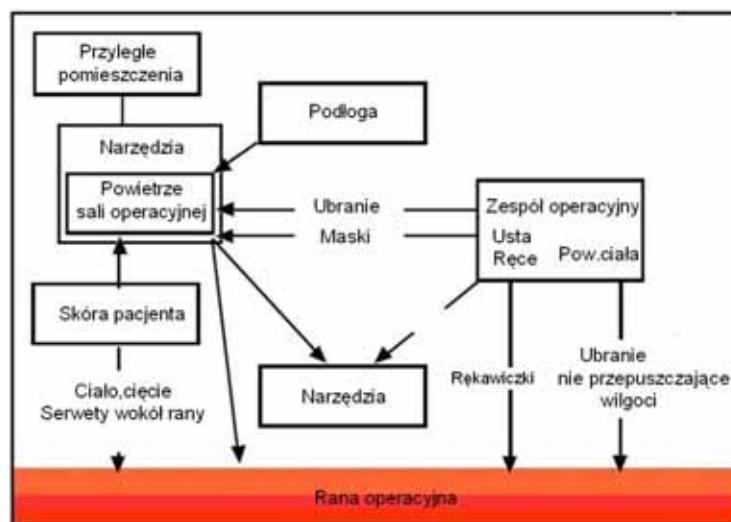


*Rys.1.61 Prostokątny strop laminarny typ OP z kurtynami bocznymi oraz mostem anestetycznym firmy ADMECO AG [139]*

## II - CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA PRACY

### 1. WPROWADZENIE DO II CZĘŚCI PRACY

Poprzez dostarczanie czystego, sterylnego powietrza w chroniony obszar krytyczny sali operacyjnej, można w sposób znaczący ograniczyć ryzyko infekcji pooperacyjnych. Rola klimatyzacji w utrzymywaniu czystości powietrza jest kluczowa, a sposób organizacji wymiany powietrza ma znaczenie zasadnicze [12]. Przedstawiana badawcza część pracy jest próbą poprawy organizacji wymiany powietrza w salach operacyjnych.



Rys.2.0 Źródła i drogi zakażeń w sali operacyjnej [74]

Na rys.2.0 przedstawiono źródła, kierunki przenoszenia oraz zależności pomiędzy czynnikami mogącymi powodować infekcje pooperacyjne. Wszystkie związane są z powietrzem sali operacyjnej. Kształtowany właściwy przepływ powietrza w sali, ogranicza możliwości przenoszenia zanieczyszczeń drogą powietrzną (m.in. z ubrania zespołu operującego, instrumentów oraz sprzętu) na samą ranę. Dla utrzymania operowanego pola (rany) w stanie wolnym od patogenów należy, m.in. przede wszystkim unikać mieszania nawiewanego powietrza sterylnego z zanieczyszczonym powietrzem sali operacyjnej i tłoczenia tej mieszaniny w kierunku rany [12].

### 2. CEL NAUKOWY PRACY

W oparciu o studia literaturowe oraz badania i analizy [34, 75, 76, 77] pracowników Katedry Klimatyzacji i Ciepłownictwa Politechniki Wrocławskiej, podjęto badania (własne) nad optymalnym zapewnieniem czystości powietrza w obrębie pola operacyjnego.

**CELEM PRACY** jest wybór systemu organizacji wymiany powietrza w salach operacyjnych i zabiegowych, uznanego za najbardziej skuteczny.

**PRZEDMIOTEM PRACY** są badania i analizy wybranych sposobów organizacji wymiany powietrza w istniejących salach operacyjnych oraz propozycja własnego rozwiązania, po szczegółowym przebadaniu na stanowisku w Politechnice Wrocławskiej

### 3. OPIS PROWADZONYCH BADAŃ ORAZ PODZIAŁ PRACY NA ETAPY

Dotychczasowe doświadczenia wykazały, że w salach operacyjnych, przy zalecanych przez ‘Wytyczne Projektowania...’ [109] krotnościach wymiany powietrza ( $12-15h^{-1}$ ), nie ma możliwości stworzenia pożądanego pola prędkości powietrza przez sufitowe nawiewniki laminarne. Wymagałoby to znacznie większych strumieni powietrza, co pociągałoby bardzo wysokie koszty eksploatacyjne. W wyniku przeprowadzonych wielu szczegółowych badań i analiz wykazano, iż jest możliwa dobra organizacja wymiany powietrza w oparciu o jeden wielkogabarytowy nawiewnik skośny, prototypowej konstrukcji. Ten skośny nawiewnik zapewnia intensywne omywanie obszaru krytycznego sterylnym powietrzem nawiewanym do sali w sposób znacznie lepszy, niż wspomniane wyżej laminarne nawiewniki sufitowe. Rozwiązanie jest jednocześnie tanie, gdyż pozwala uzyskać dużą skuteczność przy względnie małych strumieniach powietrza.

Dla osiągnięcia celu pracę prowadzono w dwóch etapach:

- **ETAP I** - dotyczył badań w obiektach rzeczywistych
- **ETAP II** – obejmował badania w specjalnie stworzonym i wyposażonym na potrzeby pracy doktorskiej, modelowym laboratorium sali operacyjnej o wymiarach zbliżonych do rzeczywistych.

W zagadnieniach związanych z przepływem strumieni powietrza nawiewanego istotna jest znajomość pól temperatur oraz rozkładu prędkości powietrza. Dostarczone do sali operacyjnej powietrze musi być sterylne, wolne od mikroorganizmów i pyłu [34, 78]. Stopień sterylności powietrza w strefie krytycznej, tj. w strefie stołu operacyjnego, zależy od kierunku i prędkości powietrza wokół stołu operacyjnego [34, 66].

#### 4. BADANIA STABILNOŚCI PRZEPŁYWU POWIETRZA W WYBRANYCH SALACH OPERACYJNYCH SZPITALI DOLNEGO ŚLĄSKA – ETAP I

W dwóch wybranych salach operacyjnych szpitali Dolnego Śląska (które były wyposażone w sufitowe nawiewniki laminarne), przeprowadzono badania strumieni powietrza nawiewanego. Wyniki powyższych stanowią materiał porównawczy dla wyników badań nad nowym rozwiązaniem, przeprowadzonych w skali technicznej, w laboratorium budynku C-6 Politechniki Wrocławskiej.

##### 4.1 CHARAKTERYSTYKA OBIEKTÓW W KTÓRYCH PRZEPROWADZONO BADANIA

Badania I etapu prowadzono w bloku operacyjnym Szpitala Powiatowego w Miliczu (rys.2.1), przy ul. Grzybowej oraz w Dolnośląskim Centrum Onkologii (DCO) we Wrocławiu (rys.2.2), przy Pl. Hirszfelda. Obiekty te należą do najnowocześniejszych placówek na terenie Dolnego Śląska pod względem rozwiązań przestrzennych, wyposażenia i instalacji, w tym klimatyzacji. W obu tych szpitalach powietrze nawiewane jest do sal operacyjnych poprzez sufitowe nawiewniki laminarne.



*Rys.2.1 Szpital Powiatowy w Miliczu  
– jedna z sal operacyjnych*



*Rys.2.2 Sala operacyjna z nawiewnikiem  
- tego samego typu jak w DCO we Wrocławiu*

##### 4.2 PARAMETRY POMIAROWE ORAZ METODYKA BADAŃ

Badania dotyczyły pomiarów temperatur i prędkości powietrza, zwłaszcza w obszarze stołu operacyjnego (zwanym w dalszej części referatu obszarem krytycznym lub ochronnym), ale także w obrębie działania samych nawiewników.

#### 4.2.1 Aparatura pomiarowa

W skład aparatury pomiarowej wchodziły: cztery sondy termo-anemometryczne (do pomiaru w zakresie niskich prędkości), Logger typu TESTO 454 z czterema gniazdami wejściowymi, skrzynka zasilająca PowerBox, oprogramowanie Comsoft3+karta PCMCIA, Laptop służący do odczytywania danych on-line. Zakres działania sondy: prędkość powietrza:  $0 \div 10$  m/s, dokładność pomiaru  $\pm 0,04$  m/s  $\pm 5\%$  wartości mierzonej, dokładność odczytu 0,01 m/s; temperatura powietrza:  $-20 \div 70^{\circ}\text{C}$ , dokładność pomiaru  $\pm 0,1$   $^{\circ}\text{C}$  wartości mierzonej, dokładność odczytu 0,01  $^{\circ}\text{C}$  wartości mierzonej. Średnią prędkość i temperaturę powietrza określono na podstawie 10 pomiarów chwilowych rejestrowanych co 1s. w danym punkcie siatki pomiarowej, i te wartości przyjmowano jako wynik pomiaru. Pomiary strumieni powietrza określono na podstawie spadków ciśnienia na regulatorach przepływu, przy użyciu mikromanometru elektronicznego. Prędkości powietrza na nawiewnikach mierzono elektronicznym anemometrem skrzydełkowym. Dla dobrego pomiaru wartości mierzonych, sondy pomiarowe umocowano do specjalnego statywu (rys.2.3). Umożliwiał on pomiar w wybranym punkcie przestrzeni na siatce pomiarowej, za pomocą 'suwnicy trójpunktowej' własnej konstrukcji (rys.2.4).



Rys.2.3 Statyw pomiarowy w sali operacyjnej w Miliczu, w której dokonywano pomiarów; widoczna jest siatka pomiarowa, wyklejona taśmą na posadzce



Rys.2.4 Suwnica trójpunktowa-własnej konstrukcji, umożliwiająca kontrolę nad przemieszczaniem się statywu wraz z aparaturą pomiarową; urządzenie umożliwia kalibrację statywu na potrzeby dowolnej siatki pomiarowej



*Rys.2.5 Jeden z badaczy (autor pracy) zapisujący pomiary on-line na komputerze, w sali operacyjnej w Miliczu, w specjalnej odzieży ochronnej, umożliwiającej wejście na blok operacyjny*

### 4.3 SALA OPERACYJNA SZPITALA POWIATOWEGO W MILICZU PRZY UL. GRZYBOWEJ

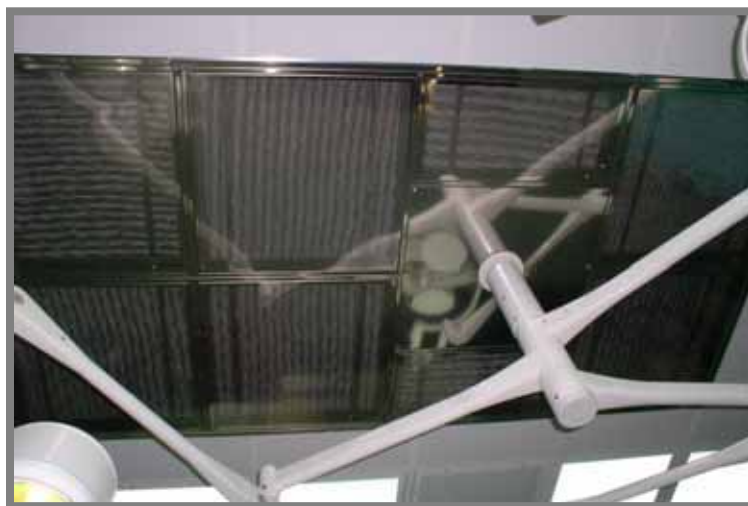
#### **4.3.1 Wyposażenie badanej sali, podstawowe parametry nawiewu oraz siatka pomiarowa**

Blok operacyjny Szpitala w Miliczu składa się z trzech sal operacyjnych, pomieszczeń przygotowania pacjenta i lekarzy, sali wybudzeń oraz korytarzy czystego i brudnego. Pomieszczenia te mieszczą się na wysokim parterze istniejącego budynku. Do klimatyzacji sal operacyjnych, wraz z pomieszczeniami przygotowania pacjenta, przewidziano odrębny układ nawiewno-wywiewny. Badania dotyczące rozplwów powietrza przeprowadzono w sali nr 2/36 o kubaturze  $K=123 \text{ m}^3$  (rys.2.6).



*Rys.2.6 Wyposażenie sali operacyjnej w Miliczu, widoczne: 4 sondy pomiarowe na statywie, dwie wielorefleksyjne lampy bezcieniowe oraz modelowy pacjent (drugi z badaczy) leżący na stole operacyjnym*

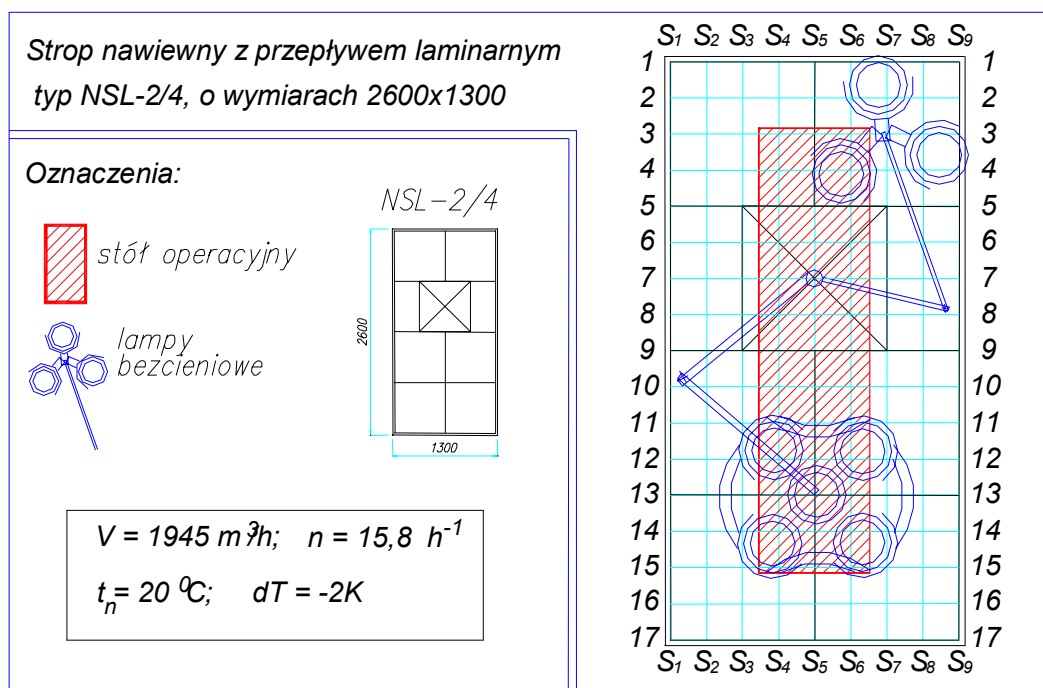
Sala ta posiada nawiewnik stropowy typu NSL-2/4 o wymiarach 2600x1300mm, zawieszony na wysokości  $H=3,10\text{m}$  nad podłogą. Składa się on z sześciu nawiewnych płyt perforowanych o wymiarach 600x600 mm, dwóch płyt, o wymiarach 300x600 mm oraz jednej płyty o wymiarach 600x600 mm, służącej do montażu lamp bezcieniowych (ta nie stanowi płaszczyzny nawiewnej), rozmieszczonych jak na rys.2.7 i rys.2.8. Przed każdą płytą zamontowany jest filtr absolutny kl.



Rys.2.7 Nawiewnik sufitowy laminarny typ NSL 2/4 w Szpitalu w Miliczu

EU-13. Do pomieszczenia doprowadzane jest powietrze o temperaturze niższej od temperatury powietrza pomieszczenia o  $\Delta t=-2\text{K}$ . Wartość tę obliczono odejmując od średniej temperatury nawiewu, średnią temperaturę powietrza w pomieszczeniu, w oparciu o pomiary w kilku, losowo wybranych punktach sali, znajdujących się poza bezpośrednim polem działania nawiewnika, w obszarze strefy przebywania ludzi. Natężenie przepływającego przez nawiewnik powietrza przy prędkości wypływu  $w_0=0,16\text{ m/s}$  wynosiło  $V=1945\text{ m}^3/\text{h}$  dla powierzchni  $A=3,38\text{ m}^2$ . Stwarza to krotność wymian powietrza w pomieszczeniu równą  $\psi=15,8\text{h}^{-1}$ . Pod nawiewnikiem umieszczono dwie lampy wieloreflektorowe o obudowie pierścieniowej, jak na rys.2.8. Jedna z lamp posiada trzy, a druga pięć żarówek. Moc każdej z żarówek wynosiła 50W. Lampy zawieszono na wysokości 2,0 - 2,2 m nad posadzką. Poza lampami bezcieniowymi w sali włączone było oświetlenie górne o łącznej mocy ok. 500 W. Bezpośrednio pod działaniem nawiewnika (na wysokości  $h=0,8\text{m}$  nad posadzką) znajdował się stół operacyjny o wymiarach 0,5x2,0m. Badania rozkładu prędkości przepływu oraz temperatury powietrza w pomieszczeniu prowadzono w jedenastu pionowych płaszczyznach pomiarowych, na wysokościach: 3,0 m, 2,8m, 2,6m, 2,4m, 2,2m, 2,0m, 1,8m, 1,6m, 1,4m, 1,2m, 1,0m, w obrębie działania nawiewnika sufitowego. Każda z poziomych płaszczyzn pomiarowych zawiera 153 punkty pomiarowe rozmieszczone co 16cm, w obu kierunkach (rys.2.8). Numerowane są odpowiednio od 1-17 (na długości) oraz od S1-S9

(na szerokości) i tworzą prostokąt o wymiarach 256 x 128 cm. Łącznie stanowi to 1683 p-któw pomiarowych. W pomieszczeniu przebywały dwie osoby prowadzące pomiary.



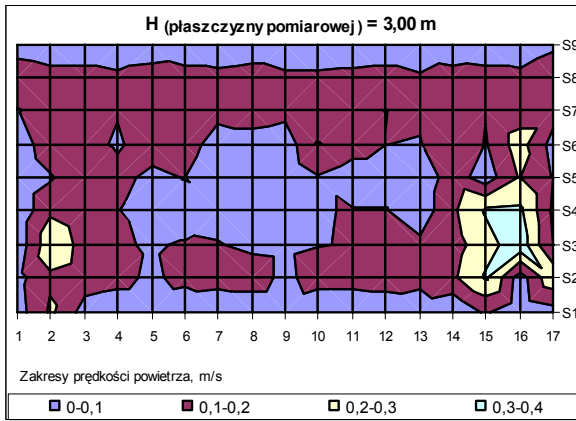
Rys.2.8 Nawiewnik sufitowy laminarny w Szpitalu w Miliczu, wraz z usytuowaniem stołu operacyjnego i lamp bezcieniowych oraz naniesioną siatką pomiarową, powtarzalną dla jedenastu płaszczyzn..

#### 4.3.2 Wyniki pomiarów i ich wstępna ocena

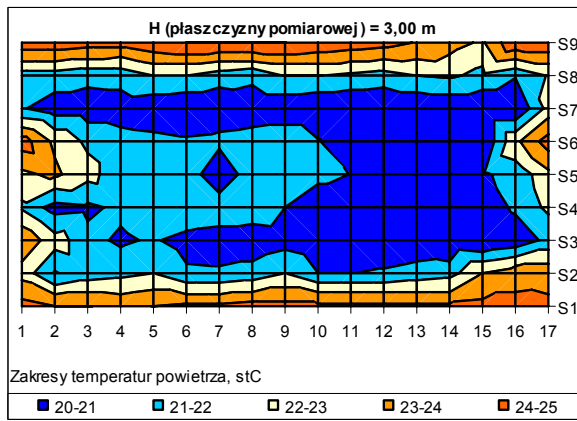
Wyniki badań zebrano w tabelach pomiarowych. Pola prędkości oraz temperatur powietrza przedstawiono w formie wykresów warstwowych (rys.2.9 a i b – rys.2.19 a i b) dla jedenastu poziomych płaszczyzn pomiarowych na określonych wysokościach. Wykresy wykonano przy użyciu arkusza kalkulacyjnego programu komputerowego *Microsoft Excel*. Oznaczenia poszczególnych punktów pomiarowych na wykresach odpowiadają oznaczeniom przedstawionym na schemacie siatki pomiarowej, zamieszczonej na rys.2.8. Ponadto wykonano rozkłady prędkości i temperatur powietrza dla dwóch wybranych płaszczyzn pionowych. Pierwsza z nich - płaszczyzna nr 7 (rys.2.20), jest prostopadła do dłuższej osi stołu operacyjnego i przechodzi przez tuleję mocującą ramiona lamp operacyjnych do konstrukcji stropu. Druga - płaszczyzna nr S5 (rys.2.21), pokrywa się z osią symetrii stołu operacyjnego. W punktach oznaczonych jako 'x' pomiar ze względów technicznych był niemożliwy.



a)

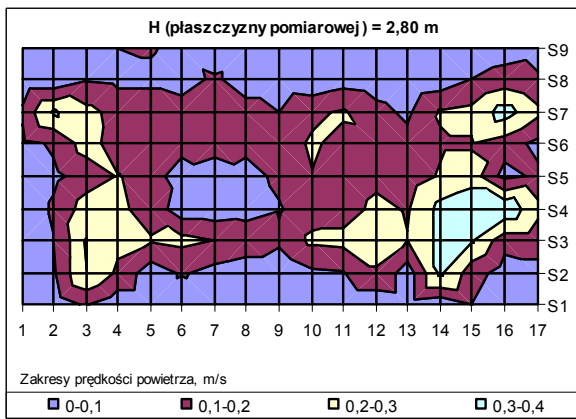


b)

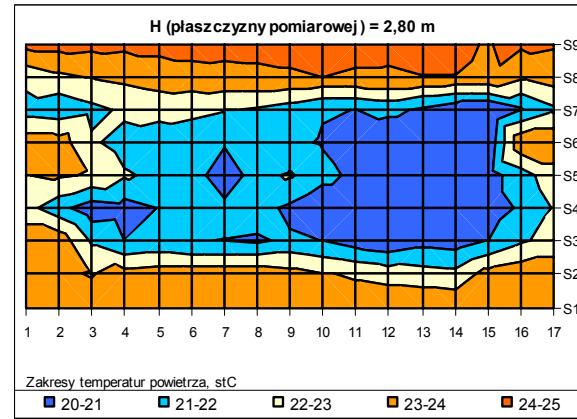


Rys.2.9 a i b Rozkład pól prędkości i temperatur powietrza w obszarze działania nawiewnika dla płaszczyzny pomiarowej na wysokości H=3,00m; Szpital w Miliczu;

a)

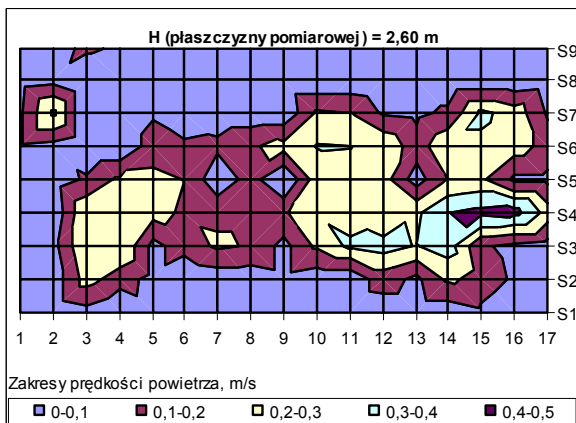


b)

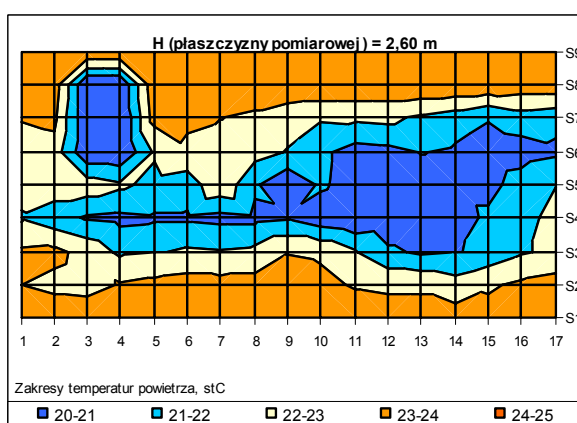


Rys.2.10 a i b Rozkład pól prędkości i temperatur powietrza w obszarze działania nawiewnika dla płaszczyzny pomiarowej na wysokości H=2,80m; Szpital w Miliczu;

a)

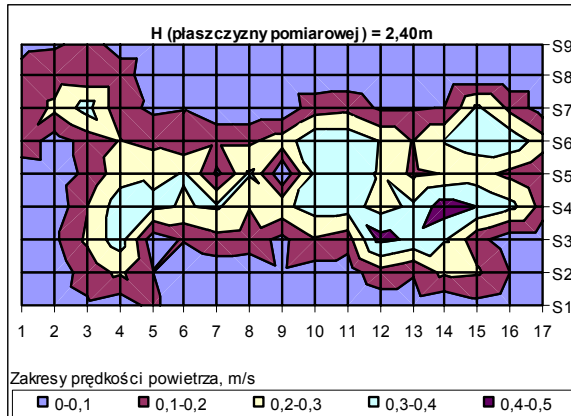


b)

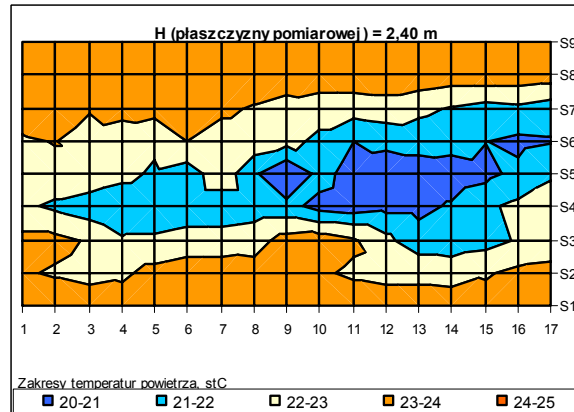


Rys.2.11 a i b Rozkład pól prędkości i temperatur powietrza w obszarze działania nawiewnika dla płaszczyzny pomiarowej na wysokości H=2,60m; Szpital w Miliczu;

a)

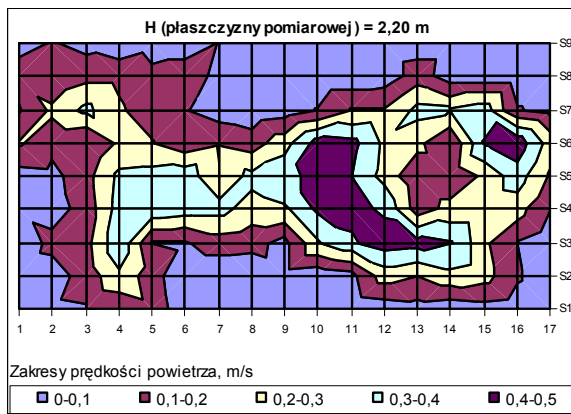


b)

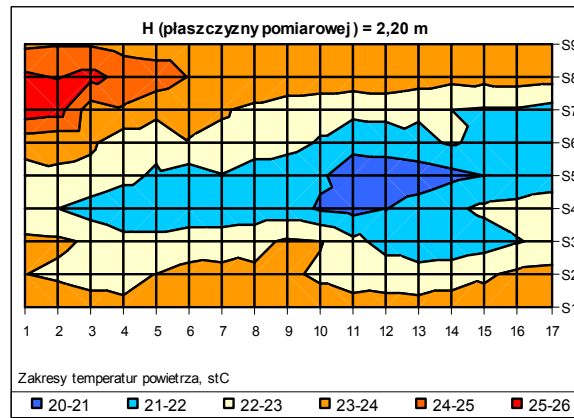


Rys.2.12 a i b Rozkład pól prędkości i temperatur powietrza w obszarze działania nawiewnika dla płaszczyzny pomiarowej na wysokości H=2,40m; Szpital w Miliczu;

a)

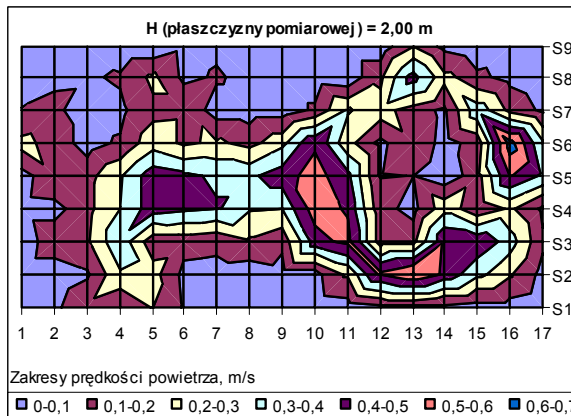


b)

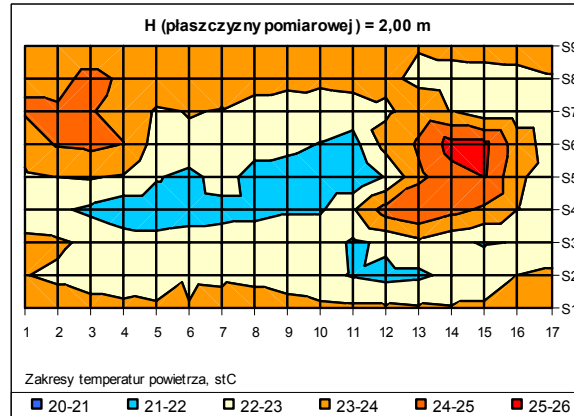


Rys.2.13 a i b Rozkład pól prędkości i temperatur powietrza w obszarze działania nawiewnika dla płaszczyzny pomiarowej na wysokości H=2,20m; Szpital w Miliczu;

a)

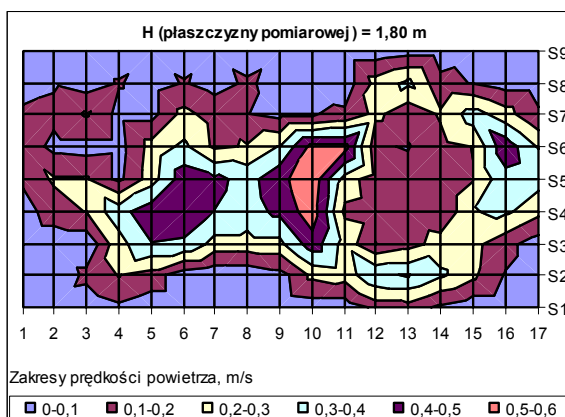


b)

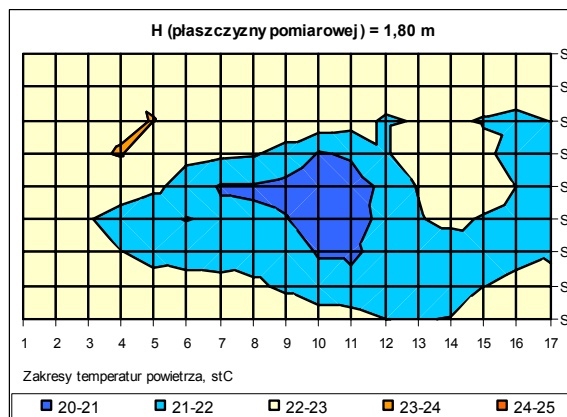


Rys.2.14 a i b Rozkład pól prędkości i temperatur powietrza w obszarze działania nawiewnika dla płaszczyzny pomiarowej na wysokości H=2,00m; Szpital w Miliczu;

a)

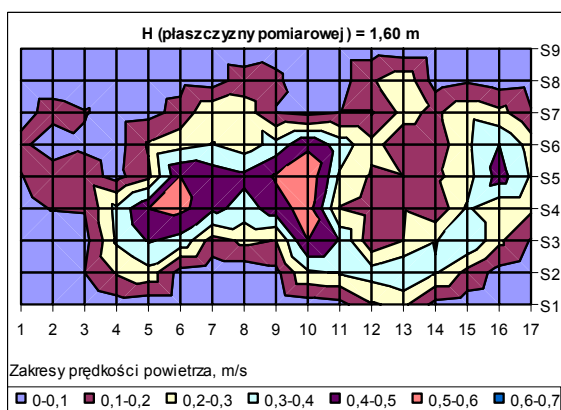


b)

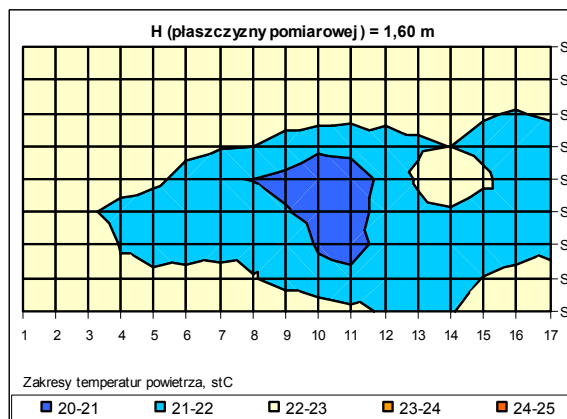


Rys.2.15 a i b Rozkład pól prędkości i temperatur powietrza w obszarze działania nawiewnika dla płaszczyzny pomiarowej na wysokości  $H=1,80m$ ; Szpital w Miliczu;

a)

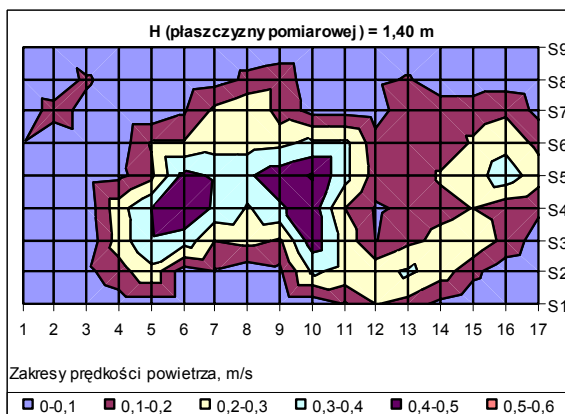


b)

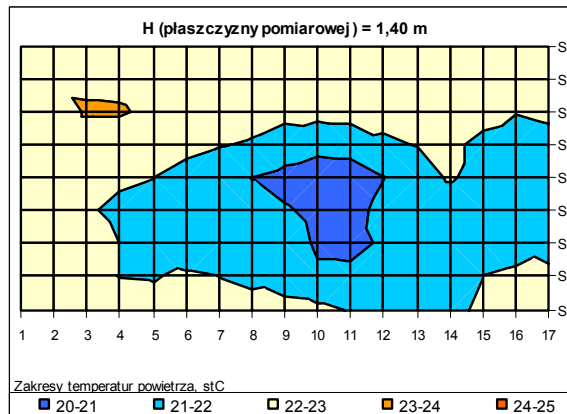


Rys.2.16 a i b Rozkład pól prędkości i temperatur powietrza w obszarze działania nawiewnika dla płaszczyzny pomiarowej na wysokości  $H=1,60m$ ; Szpital w Miliczu;

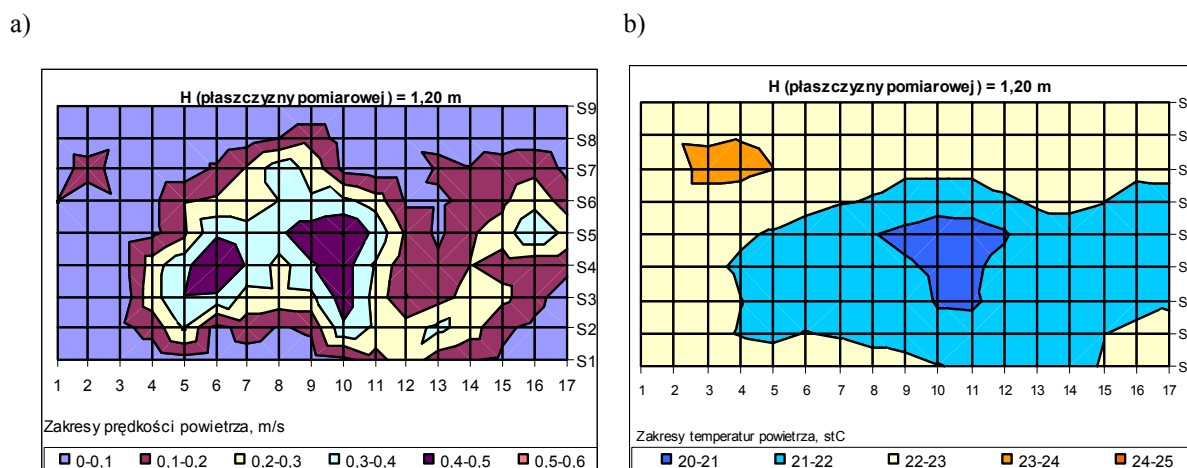
a)



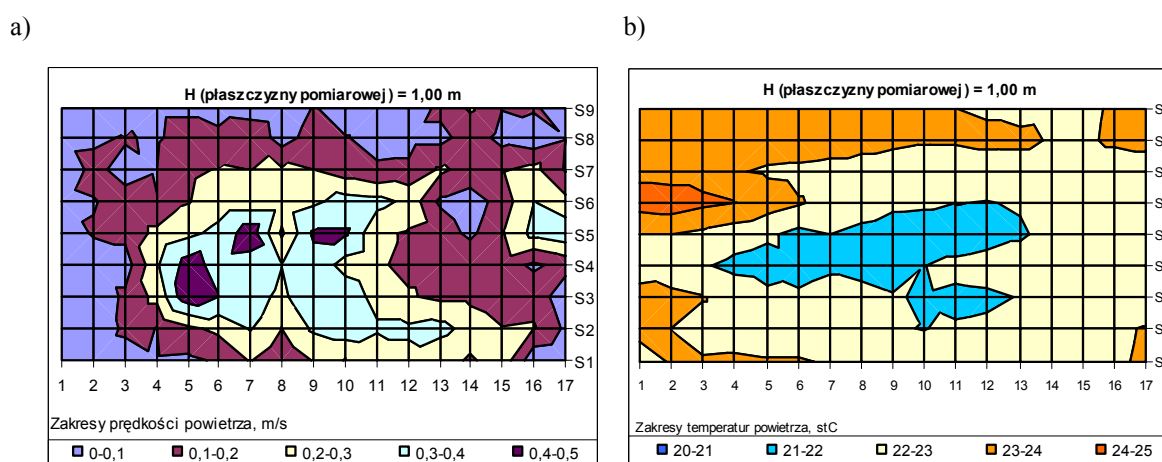
b)



Rys.2.17 a i b Rozkład pól prędkości i temperatur powietrza w obszarze działania nawiewnika dla płaszczyzny pomiarowej na wysokości  $H=1,40m$ ; Szpital w Miliczu;



Rys. 2.18 a i b Rozkład pól prędkości i temperatur powietrza w obszarze działania nawiewnika dla płaszczyzny pomiarowej na wysokości  $H=1,20\text{m}$ ; Szpital w Miliczu;

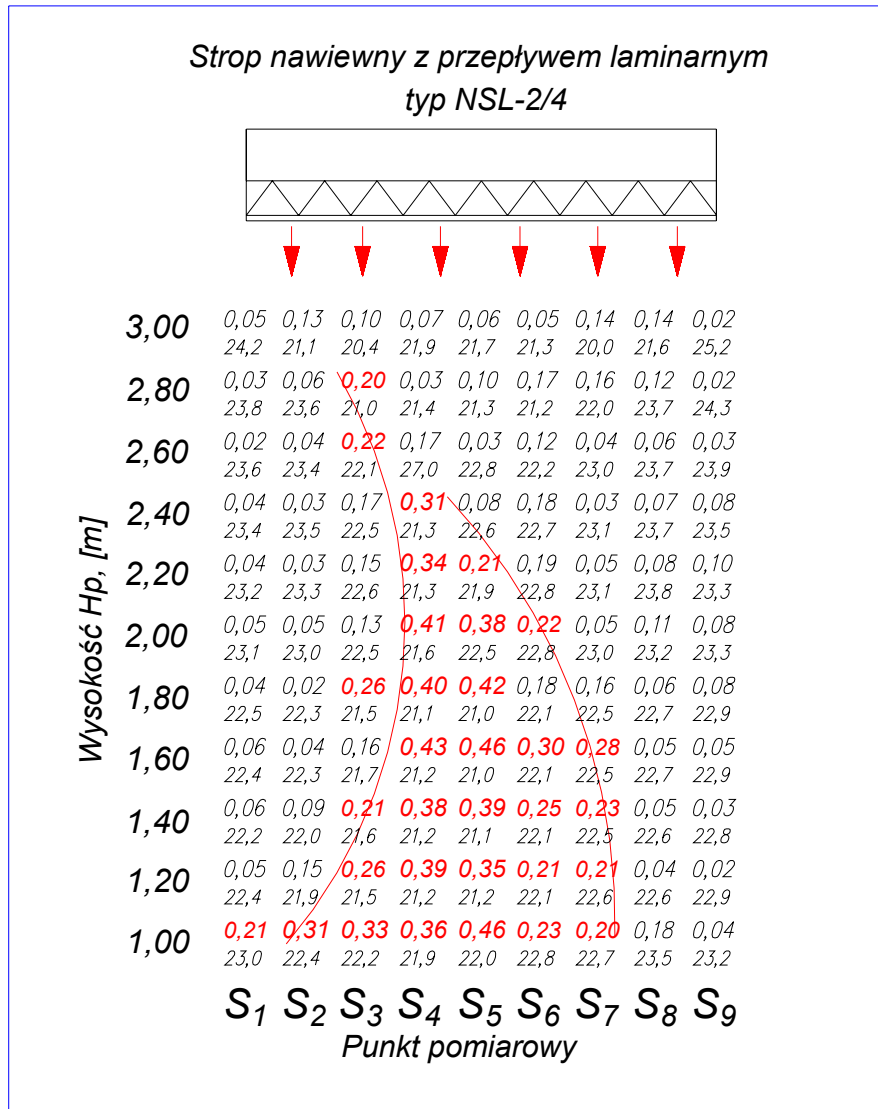


Rys. 2.19 a i b Rozkład pól prędkości i temperatur powietrza w obszarze działania nawiewnika dla płaszczyzny pomiarowej na wysokości  $H=1,00\text{m}$ ; Szpital w Miliczu;

#### 4.3.2.1 Analiza sporządzonych wykresów

Na pierwszym z rysunków (rys. 2.9a) z rozkładem pól prędkości w odległości 10 cm od płaszczyzny nawiewu, widoczny jest dość stabilny wpływ powietrza, poprzez strop nawiewny (z wyjątkiem części środkowej). Prędkości, na wysokości 3,0 m nad posadzką, zawierają się w przedziale 0,1 – 0,2 m/s. Natomiast w części środkowej, wyraźnie widoczny jest wpływ elementu służącego do mocowania lamp bezcieniowych, który, jak już wspomniano, nie stanowi faktycznej powierzchni wpływu powietrza (jest tam zanik ruchu powietrza). Stan ten obserwować możemy również w kolejnej płaszczyźnie pomiarowej (rys. 2.10a). Rozkład temperatur (rys. 2.9b i rys. 2.10b) sugeruje, iż powietrze dostarczane do nawiewnika jest z prawej

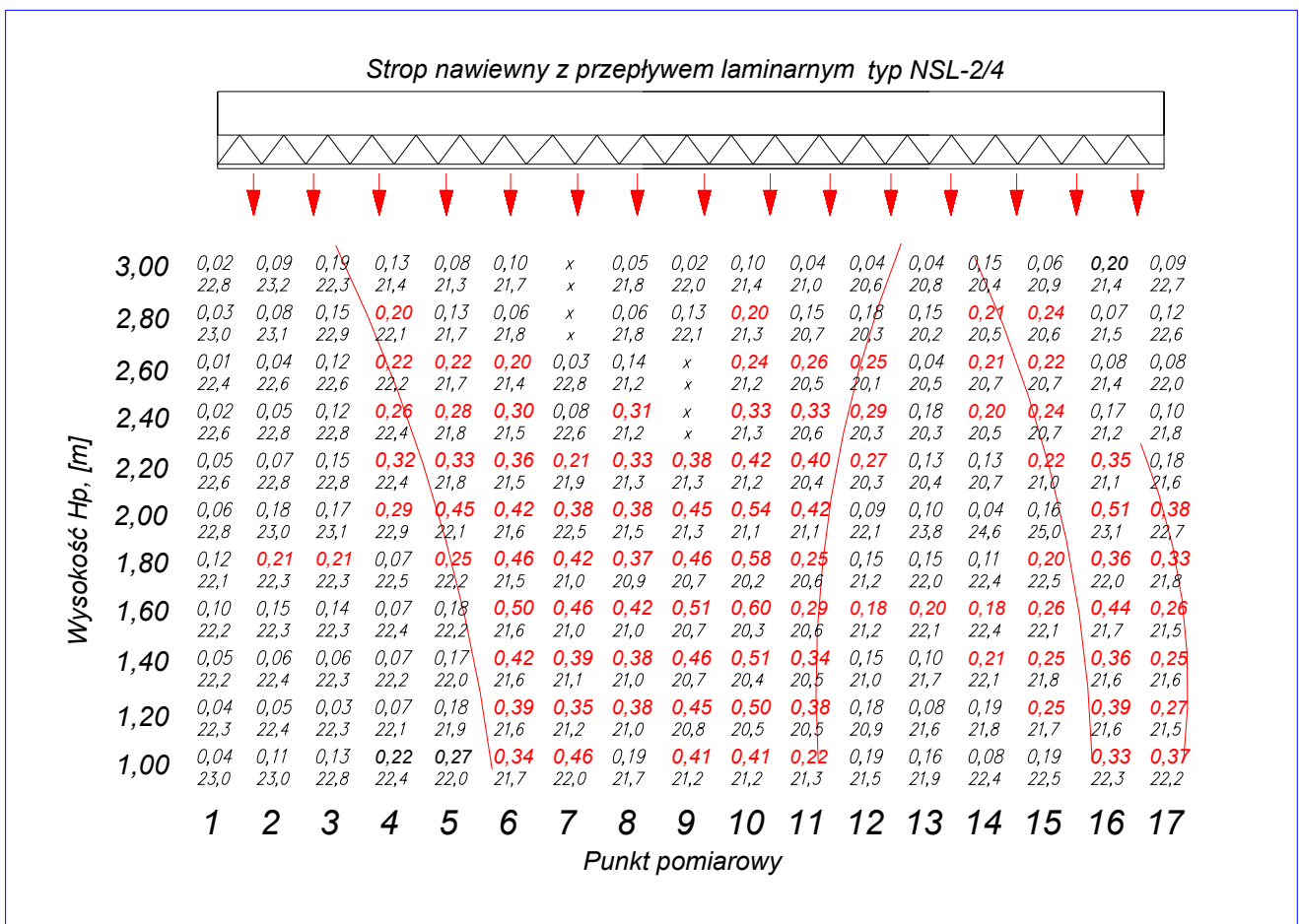
strony. Stąd tam cała masa powietrza o temperaturze nawiewu najniższej z osiągniętych (20 – 21°C) za centralą



Rys. 2.20 Rozkład prędkości przepływu i temperatur powietrza w pionowej płaszczyźnie pomiarowej nr 7 (sala operacyjna Szpitala w Miliczu)

klimatyzacyjną. Wynikające z rozkładu temperatur podłączenie nawiewnika do sieci przewodów zgodne jest ze stanem faktycznym (porównano z projektem). Z pomiarów prędkości powietrza, na wykresach (rys.2.9a do 2.17a), zauważyć można, iż wraz z oddalaniem się od płaszczyzny nawiewu, następuje wzrost prędkości powietrza. Zjawiska te widoczne są również na rys.2.20 i rys.2.21. Maksymalna prędkość przepływu powietrza pod nawiewnikiem wyniosła aż  $w=0,60$  m/s (rys.2.21- punkt pomiarowy nr 10, na wys. 1.60 m nad posadzką) w odległości 1,50 m od płaszczyzny nawiewnej. Nastąpił więc prawie czterokrotny wzrost prędkości powietrza w odniesieniu do prędkości wypływu powietrza z nawiewnika. Z danych

przedstawionych na *rys.2.13a i b*, *rys.2.14 a i b*, *rys.2.15 a i b*, wyraźnie widać niekorzystny wpływ lampy bezcieniowej na rozkład prędkości i temperatur powietrza w obszarze stołu operacyjnego. Temperatura powietrza w tym obszarze rośnie, osiągając najwyższe wartości: 25–26<sup>0</sup>C. Warto zauważyć, że ta najwyższa temperatura powietrza występuje na wysokości głów personelu operującego. Tymczasem prędkości powietrza w tym obszarze są najniższe. Zdolność chłodząca środowiska jest tu więc wyjątkowo mała i praca chirurgów w takich warunkach na pewno spotka się z dezaprobatą. Masy powietrza, szukając dla siebie alternatywnej drogi przepływu, omijają przeszkodę jaką stanowi lampa bezcieniowa. Przebieg tego zjawiska jest wyraźnie widoczny na *rys.2.14a*, *rys.2.15a i rys.2.16a*. W związku z powyższym, struga powietrza nawiewanego musi pokonać drogę dłuższą w czasie, niż wynikałoby to z pierwotnie obranego kierunku ruchu. Powoduje to wzrost prędkości (zgodne z zasadą zachowania pędu) na obrzeżach lamp. Z rozkładu pól prędkości dokładnie wskazać można miejsce usytuowania pięcioletniej lampy bezcieniowej (*rys.2.14a*, *rys.2.15a i rys.2.16a*). Na tym jednak nie koniec zakłóceń przepływu powietrza, wywołanych lokalizacją lamp w polu działania nawiewnika. Na *rys.2.20* uwidacznia się szczególnie wyraźne odchylenie



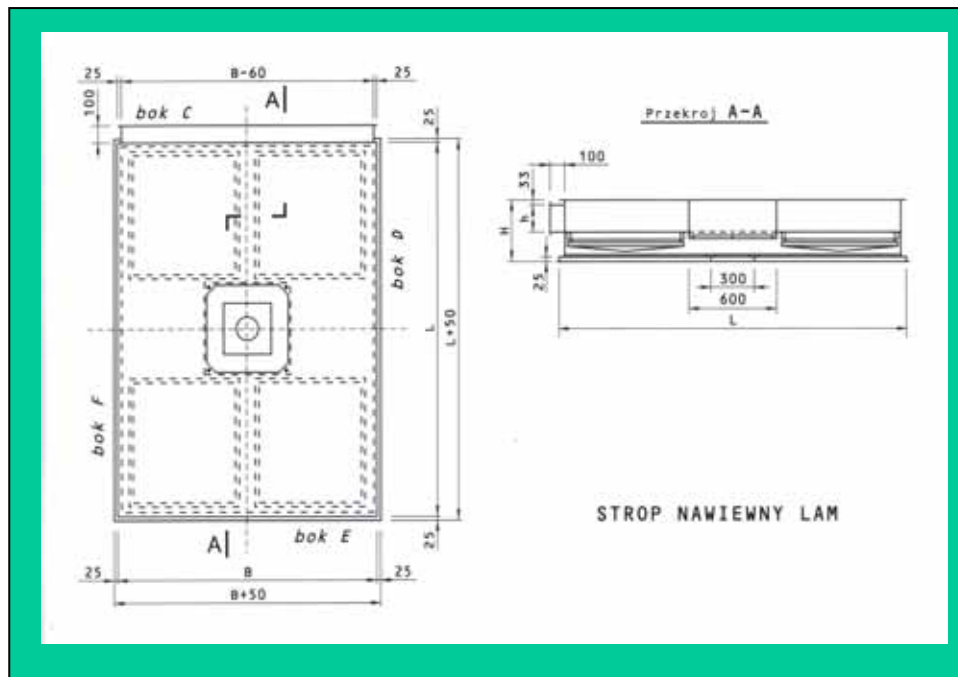
Rys. 2.20 Rozkład prędkości przepływu i temperatur powietrza w pionowej płaszczyźnie pomiarowej nr S5 (sala operacyjna Szpitala w Miliczu)

strumienia powietrza nawiewanego, które jest spowodowane znacznymi zyskami ciepła w obszarze zajmowanym przez jedną z lamp bezcieniowych. Z kolei na *rys.2.21* widoczne jest zjawisko przewężania się strugi głównej strumienia powietrza nawiewanego. Tworzy się coś na kształt 'kominów' [34], które zaznaczono czerwonymi liniami. Zjawisko to wiąże się bezpośrednio ze, wspomnianym już wcześniej, wzrostem prędkości przepływającego powietrza. W konsekwencji opisanych zjawisk na poziomie stołu operacyjnego (płaszczyzna na wysokości 1,00 m nad posadzką), (*rys.2.19a*), pole rozkładu prędkości oraz temperatur jest niejednolite. Może to świadczyć o przypadkowości ruchu powietrza (jego dużej turbulencji) i znikomym wnikanii nawiewanego powietrza, właśnie w ten najbardziej pożądanym obszar. Prędkości powietrza w części odpowiadającej obszarowi krytycznemu, zawierają się w przedziale 0,10 – 0,50 m/s.

#### 4.4 DOLNOŚLĄSKIE CENTRUM ONKOLOGII, PRZY PL.HIRSZFELDA WE WROCŁAWIU

##### **4.4.1 Wyposażenie badanej sali, podstawowe parametry nawiewu oraz siatki pomiarowe**

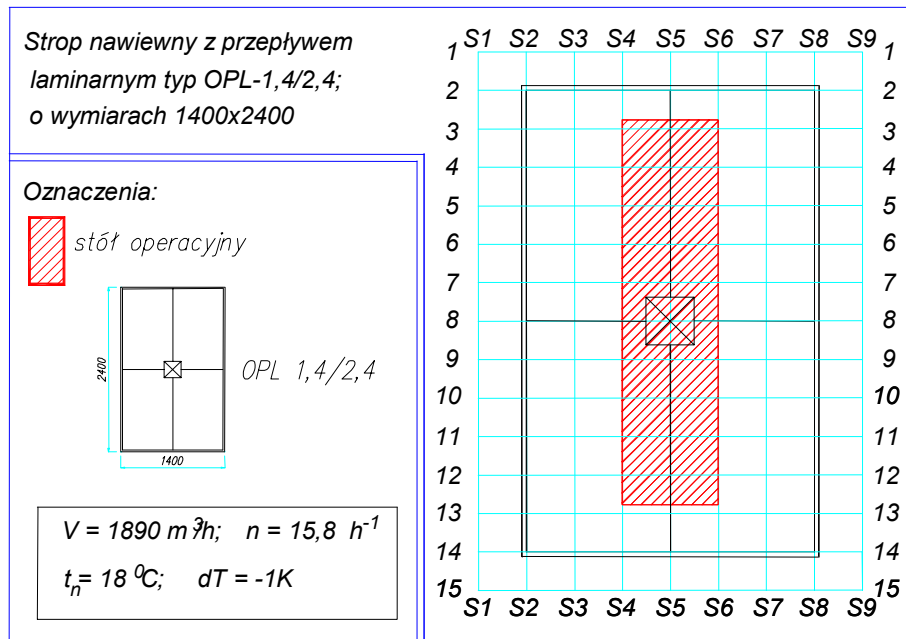
Na blok operacyjny Dolnośląskiego Centrum Onkologii we Wrocławiu składają się: cztery sale operacyjne z pomieszczeniami przygotowania pacjenta oraz lekarzy, sala wybudzeń oraz korytarze czysty i brudny. To wszystko - na wysokim parterze budynku bloku operacyjnego. Klimatyzację sal operacyjnych (wraz z pomieszczeniami przygotowania pacjenta), obsługują dwa układy klimatyzacyjne. Badania dotyczące rozplywów powietrza przeprowadzono w sali nr 2/3 o kubaturze  $K=120\text{ m}^3$ , z odrębnym urządzeniem nawiewno-wywiewnym. W sali jest nawiewnik stropowy typu OPL o wymiarach 1200 x 2400 mm, zawieszony na wysokości  $H=3,30\text{ m}$  nad podłogą (*rys.4.2*). Składa się z czterech nawiewnych płyt perforowanych ze stali nierdzewnej oraz elementu o wymiarach 250x250 mm, służącego do mocowania lamp bezcieniowych. Nawiewnik posiada dwie działki filtracyjne klasy EU13 (*rys.2.22*). Do pomieszczenia doprowadzane jest powietrze o temperaturze niższej od temperatury powietrza pomieszczenia o  $\Delta t=-1\text{ K}$ . Natężenie przepływu powietrza (przy prędkości wypływu z nawiewnika  $w_0=0,16\text{ m/s}$ ) wynosiło  $V=1890\text{ m}^3/\text{h}$ ; powierzchnia wypływu  $A=3,36\text{ m}^2$ . Krotność wymian powietrza w pomieszczeniu wynosi  $\psi=15,8\text{ h}^{-1}$ . W sali włączone było oświetlenie górne o łącznej mocy ok. 500 W.



Rys. 2.22 Nawiewnik sufitowy laminarny typ OPL, zastosowany w badanej sali operacyjnej DCO we Wrocławiu

W trakcie prowadzenia pomiarów, sale operacyjne nowo wybudowanego bloku operacyjnego, nie były jeszcze oddane do eksploatacji i nie posiadały wyposażenia. Wiadomo, że w systemach wporowych o małej turbulencji przepływ powietrza może być zakłócony nawet już w pustym pomieszczeniu, dlatego obiekt taki był interesujący i celowo stał się przedmiotem badań. Pomiary rozkładu prędkości przepływu i temperatury powietrza w pomieszczeniu, przeprowadzono w dziesięciu płaszczyznach pomiarowych na wysokościach: 3,10m, 2,85m, 2,60m, 2,35m, 2,10m, 1,85m, 1,60m, 1,35m, 0,95m, 0,70m; w obrębie działania nawiewnika sufitowego. Każda z płaszczyzn pomiarowych zawierała 135 punktów pomiarowych rozmieszczonych jak na rys.2.23, w odległościach co 25 i 20 cm. Numerowane są one odpowiednio od 1-15 (na długości) i od S1-S9 (na szerokości). Łącznie było 1350 punktów pomiarowych. W pomieszczeniu znajdowały się dwie osoby prowadzące pomiary.



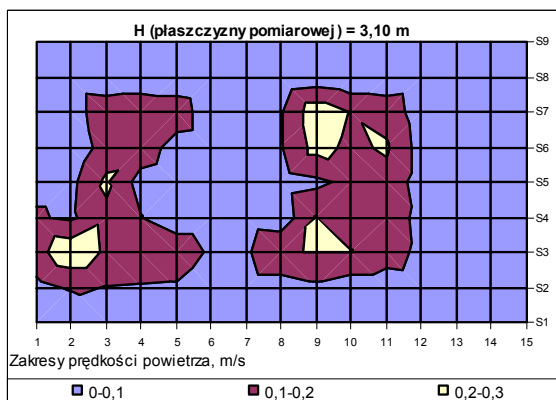


Rys.2.23 Nawiewnik sufitowy laminarny w DCO we Wrocławiu, wraz z usytuowaniem stołu operacyjnego oraz naniesioną siatką pomiarową

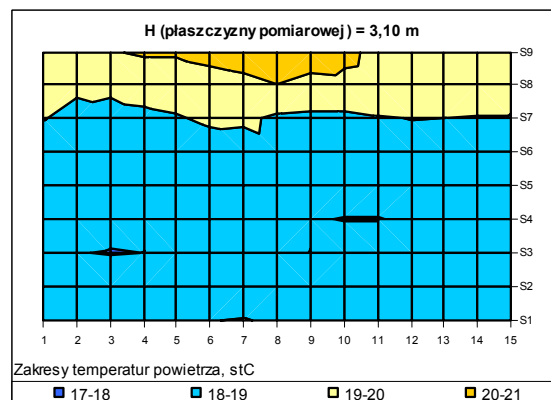
#### 4.4.2 Wyniki pomiarów i ich wstępna analiza

Wyniki badań zestawiono w tabelach pomiarowych. Pola prędkości oraz temperatur powietrza przedstawiono w formie wykresów warstwowych na rys.2.24–rys.2.33, dla dziesięciu poziomych płaszczyzn, w których mierzono badane wartości. Wykresy wykonano przy użyciu arkusza kalkulacyjnego *Microsoft Excel*. Oznaczenia poszczególnych punktów pomiarowych odpowiadają przedstawionym na schemacie siatki pomiarowej, zamieszczonej na rys.2.23. Ponadto wykonano rozkłady prędkości i temperatur powietrza dla dwóch wybranych płaszczyzn pionowych. Pierwsza płaszczyzna nr 9 (rys.2.34) jest prostopadła do osi wzdłużnej stołu operacyjnego i jest przesunięta o 20 cm od krótszej z osi symetrii układu. Druga płaszczyzna nr S6 (rys.2.35) jest przesunięta o 25 cm od dłuższej osi stołu operacyjnego.

a)

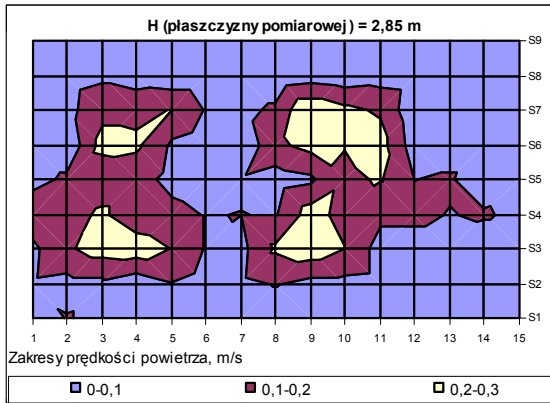


b)

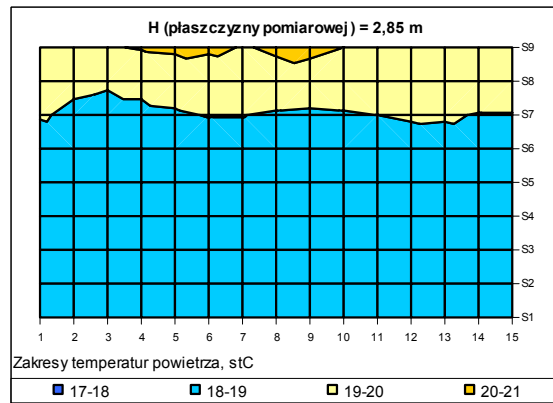


Rys.2.24 a i b Rozkład pól prędkości i temperatur powietrza w obszarze działania nawiewnika dla płaszczyzny pomiarowej na wysokości  $H=3,10\text{m}$ ; DCO we Wrocławiu;

a)

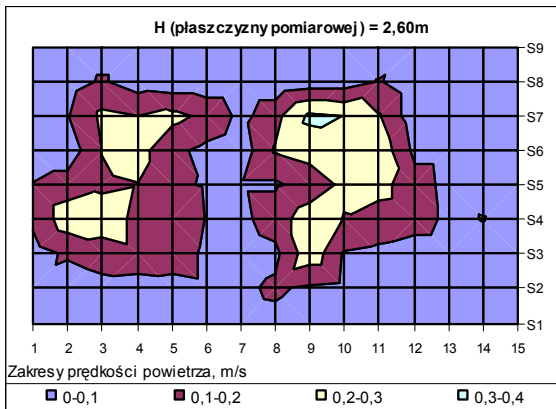


b)

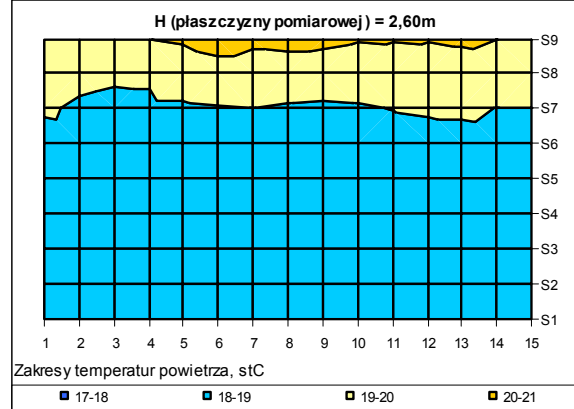


Rys.2.25 a i b Rozkład pól prędkości i temperatur powietrza w obszarze działania nawiewnika dla płaszczyzny pomiarowej na wysokości  $H=2,85m$ ; DCO we Wrocławiu;

a)

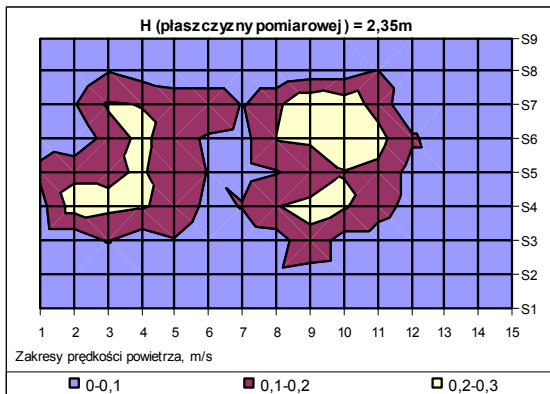


b)

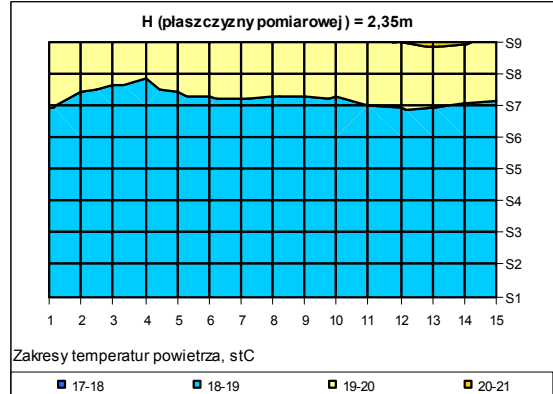


Rys.2.26 a i b Rozkład pól prędkości i temperatur powietrza w obszarze działania nawiewnika dla płaszczyzny pomiarowej na wysokości  $H=2,60m$ ; DCO we Wrocławiu;

a)

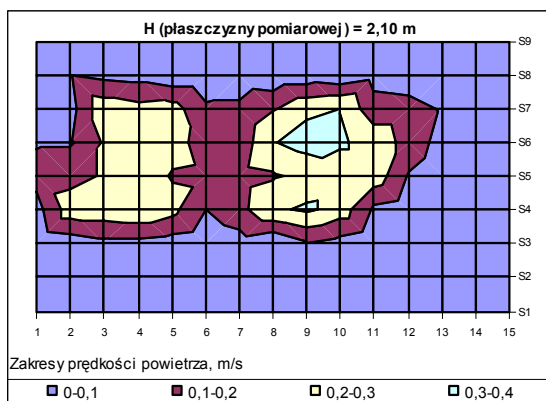


b)

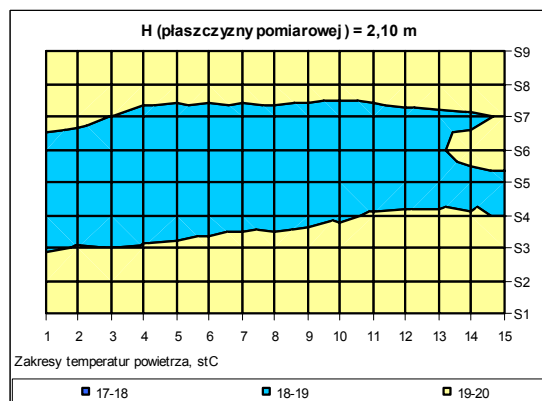


Rys.2.27 a i b Rozkład pól prędkości i temperatur powietrza w obszarze działania nawiewnika dla płaszczyzny pomiarowej na wysokości  $H=2,35m$ ; DCO we Wrocławiu;

a)

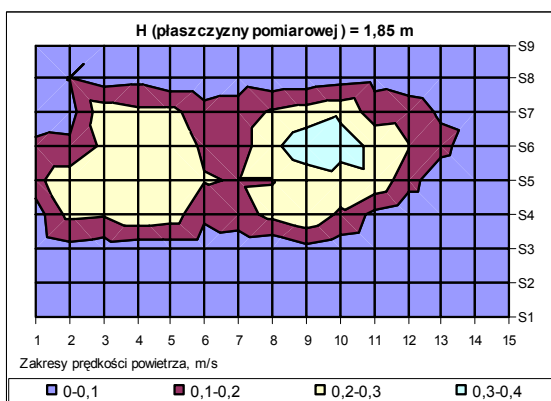


b)

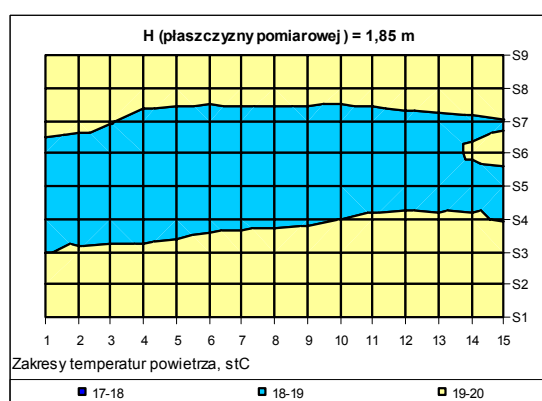


Rys.2.28 a i b Rozkład pól prędkości i temperatury powietrza w obszarze działania nawiewnika dla płaszczyzny pomiarowej na wysokości  $H=2,10m$ ; DCO we Wrocławiu;

a)

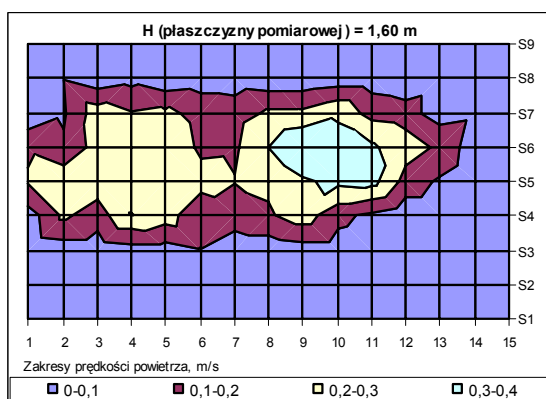


b)

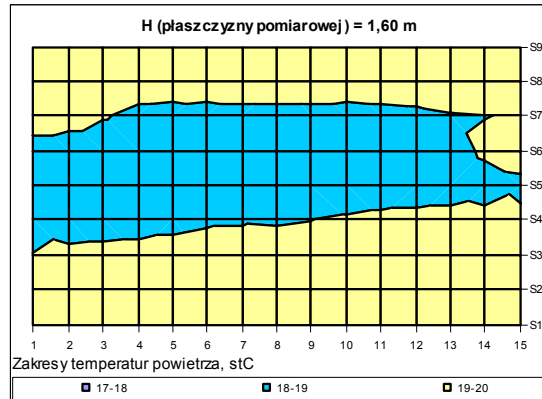


Rys.2.29 a i b Rozkład pól prędkości i temperatury powietrza w obszarze działania nawiewnika dla płaszczyzny pomiarowej na wysokości  $H=1,85m$ ; DCO we Wrocławiu;

a)

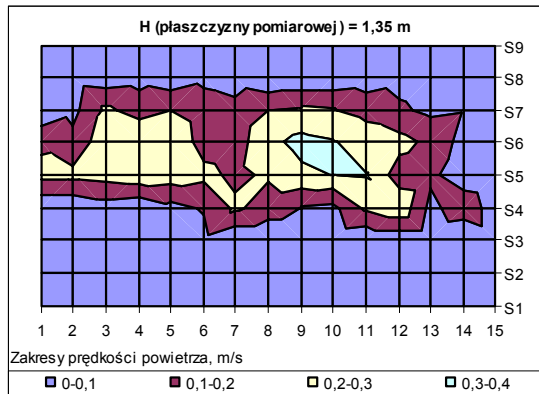


b)

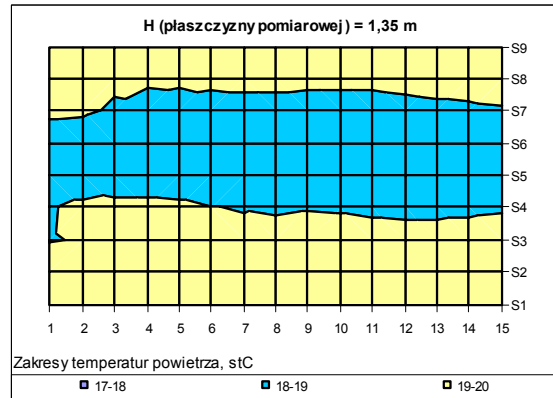


Rys.2.30 a i b Rozkład pól prędkości i temperatury powietrza w obszarze działania nawiewnika dla płaszczyzny pomiarowej na wysokości  $H=1,60m$ ; DCO we Wrocławiu;

a)

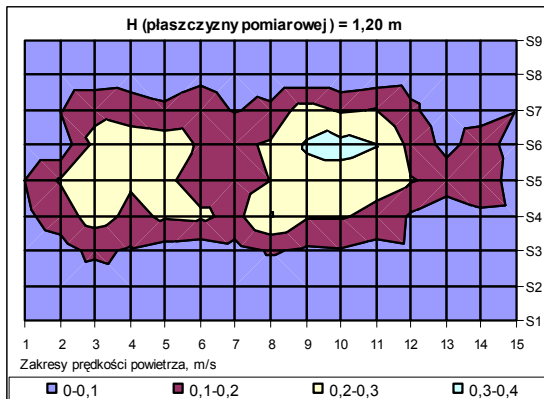


b)

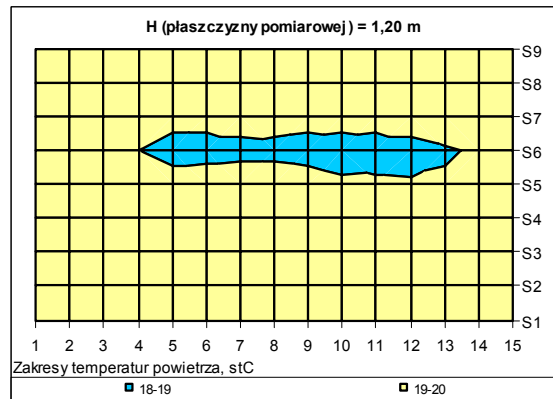


Rys.2.31 a i b Rozkład pól prędkości i temperatury powietrza w obszarze działania nawiewnika dla płaszczyzny pomiarowej na wysokości  $H=1,35m$ ; DCO we Wrocławiu;

a)

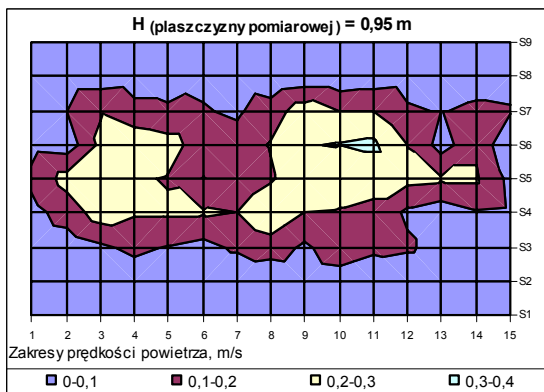


b)

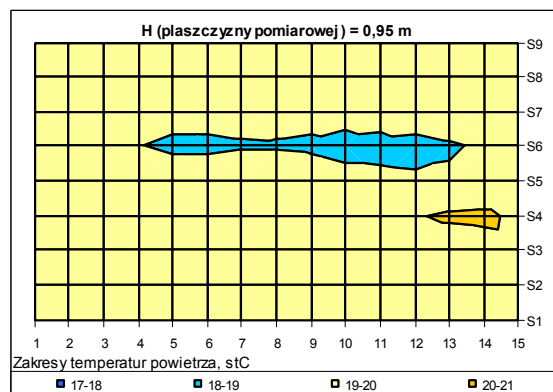


Rys.2.32 a i b Rozkład pól prędkości i temperatury powietrza w obszarze działania nawiewnika dla płaszczyzny pomiarowej na wysokości  $H=1,20m$ ; DCO we Wrocławiu;

a)



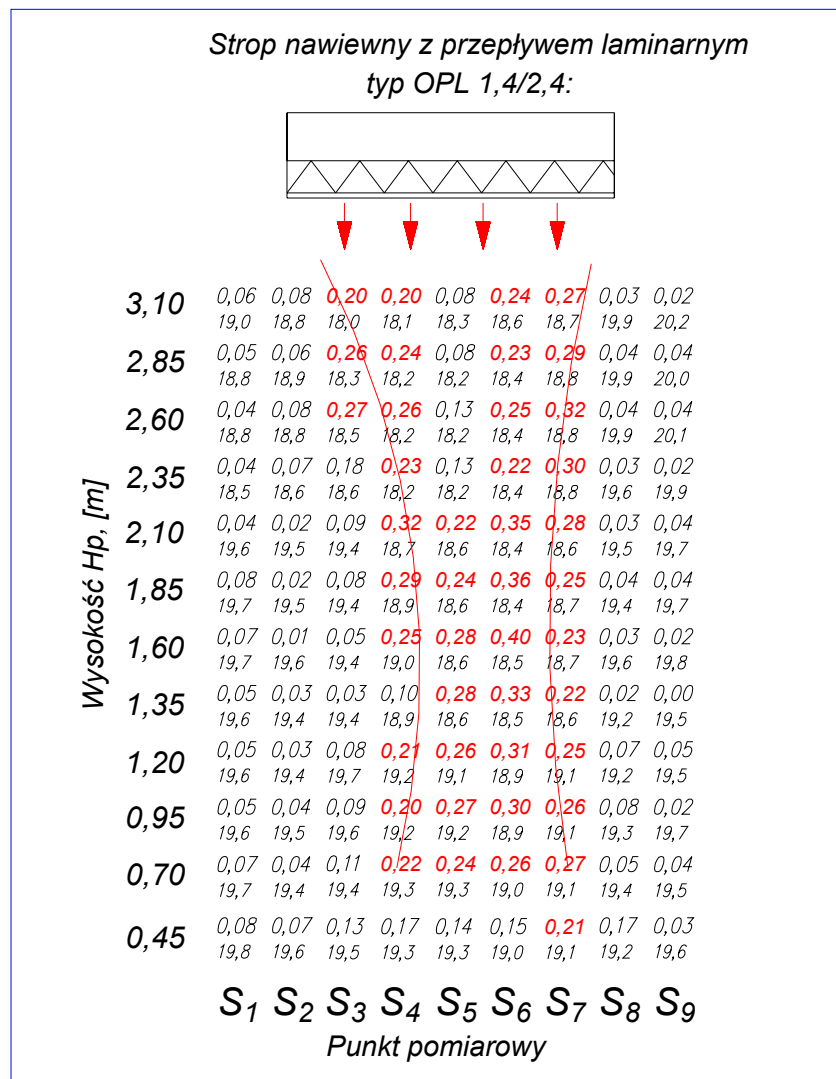
b)



Rys.2.33 a i b Rozkład pól prędkości i temperatury powietrza w obszarze działania nawiewnika dla płaszczyzny pomiarowej na wysokości  $H=0,95m$ ; DCO we Wrocławiu;

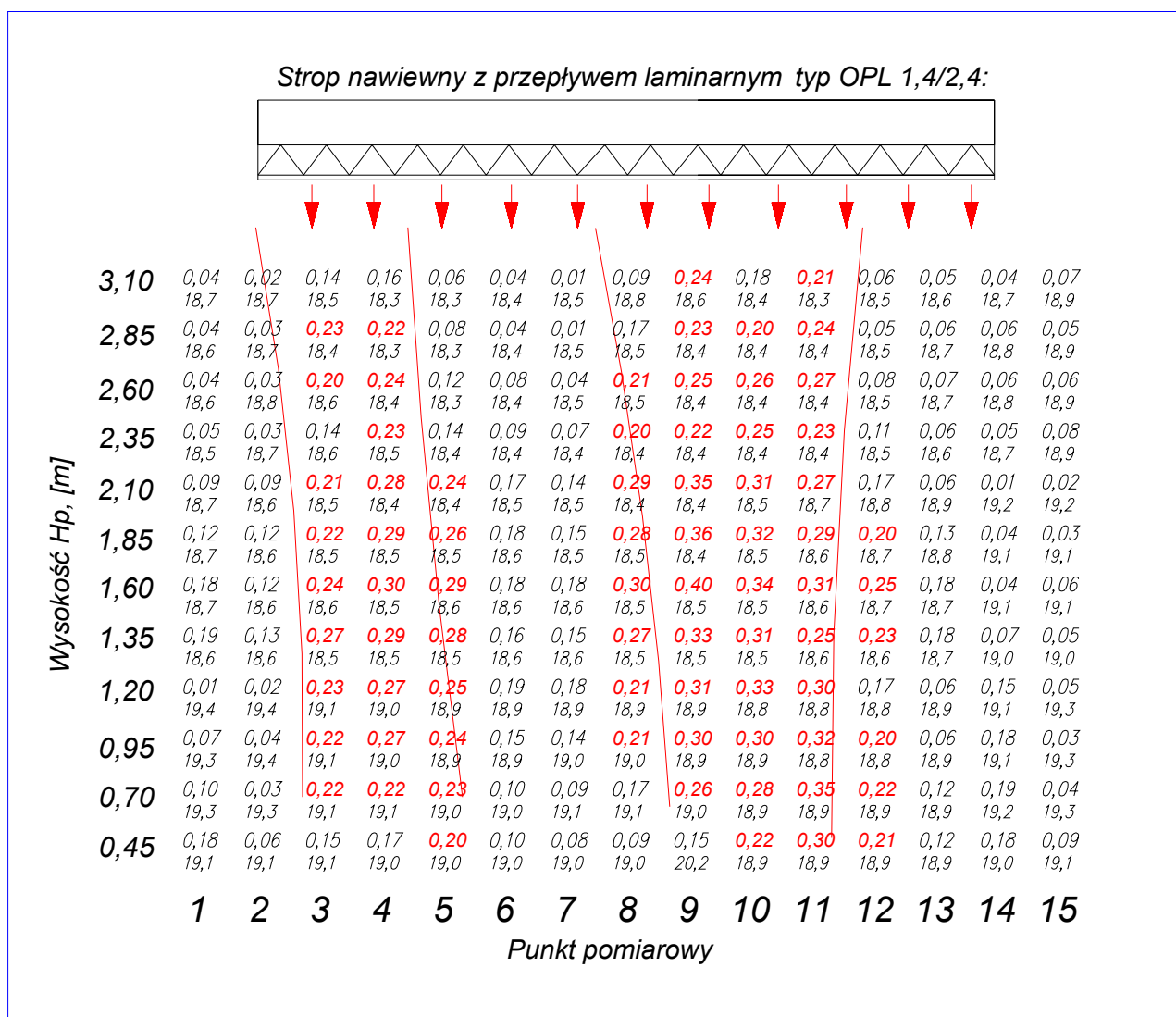
#### 4.4.3 Analiza zamieszczonych wykresów

Na pierwszym z rysunków (rys.2.24a), przedstawiającym rozkład pól prędkości w odległości 20 cm od płaszczyzny nawiewnej, wyraźnie widać, że wypływ powietrza nawiewanego nie odbywa się całą powierzchnią stropu nawiewnego. Ruch powietrza zauważalny jest tylko w dwóch obszarach, stanowiących jak gdyby ‘wyspy’ (przyp. autor) nawiewanego powietrza (rys.2.24a). W pozostałym obszarze płaszczyzny stwierdzono stagnację przepływu powietrza (bezruch). Prędkość nie osiąga tam nawet 0,10 m/s (pola zaznaczone kolorem niebieskim). Rozkład temperatury dla płaszczyzny pomiarowej na tej wysokości (rys.2.24b), wskazywać może mylnie na ruch powietrza w całym obszarze działania nawiewnika z wyłączeniem jednej z krawędzi. Można przypuszczać, iż ten równomierny rozkład temperatury (równiej ok. 18°C), jest najprawdopodobniej wynikiem promieniowania, chłodnej obudowy



Rys.2.34 Rozkład prędkości przepływu i temperatur powietrza w pionowej płaszczyźnie pomiarowej nr 9 (sala operacyjna DCO we Wrocławiu)

stropu nawiewnego. Podobnie jak w badaniach z Milicza (rys.2.20 i rys.2.21), w całym przebiegu ruchu powietrza obserwuje się wzrost prędkości powietrza wraz z oddalaniem się od płaszczyzny nawiewu. Zauważalny jest on zwłaszcza do pewnej wysokości. Maksymalna prędkość przepływu powietrza pod nawiewnikiem wyniosła  $w=0,40\text{m/s}$  (rys.2.34), w punkcie pomiarowym nr S6, na wysokości 1.60 m nad posadzką (w odległości 1,70 m od płaszczyzny nawiewnej). Nastąpił więc prawie trzykrotny wzrost prędkości. Proces ten związany jest ze zjawiskiem przewężania się strumienia powietrza nawiewanego i tworzeniu się dwóch, tzw. „kominów” [34] zakreślonych czerwonymi liniami, w ilości dwóch sztuk. Charakterystyczne jest, że w pewnej odległości od płaszczyzny nawiewu, poszczególne strumienie (‘wyspy’) łączą się, tworząc jednolitą strugę powietrza. Zjawisko to zaobserwować można, śledząc wykresy już od rys.2.24a - rys.2.31a. Na ostatnim widać już połączenie się dwóch sąsiadujących ze sobą strumieni (zaznaczono kolorem żółtym). Z rys.2.33b (płaszczyzna pomiarowa odpowiadająca wysokości zajmowanej przez stół operacyjny 0,95 m) wynika, iż pole temperatury



Rys. 2.35 Rozkład prędkości przepływu i temperatury powietrza w pionowej płaszczyźnie pomiarowej nr S6 (sala operacyjna DCO we Wrocławiu)

wytworzone przez strugę powietrza nawiewanego, w bardzo znikomym tylko stopniu pokrywa obszar krytyczny. Prędkości powietrza w tym obszarze zawierają się w przedziale 0,10 – 0,30 m/s (rys.2.32a), przy czym w zdecydowanej części tego obszaru jest zauważalny brak ruchu powietrza (podobnie jak już uprzednio), w pobliżu samej płaszczyzny nawiewnej.

#### 4.5 WNIOSKI Z PRZEPROWADZONYCH BADAŃ W OBIEKTACH RZECZYWISTYCH

##### **4.5.1 Stabilność przepływu powietrza w badanych salach**

Na podstawie uzyskanych wyników badań rozkładu pól prędkości i temperatur powietrza w obszarze działania nawiewników sufitowych, można stwierdzić, iż w badanych salach operacyjnych z nawiewnikami o laminarnym wypływie, powstaje pod nimi strumień powietrza, który już w fazie początkowej jest bardzo niestabilny. Głównie z powodu zbyt niskiej prędkości wypływu powietrza, która wynosiła średnio  $w_0 = 0,15$  m/s. Wyraźnie zauważalny jest niekorzystny wpływ lamp bezcieniowych na rozkład prędkości i temperatur powietrza.

Przepływ powietrza o małej turbulencji zakłócany jest przez lampy operacyjne, znajdujące się bezpośrednio na jego drodze (rys.2.15a). Przeszkody te nie są wyłącznie powodem rozbicia ‘szeregu równoległych strug nawiewnych’ [53] charakterystycznych dla przepływów laminarnych, ale są również przyczyną powstawania prądów konwekcyjnych. Temperatura górnej warstwy powierzchni lamp dochodziła nawet do 50<sup>0</sup>C, w efekcie wywołując ruch powietrza do góry, i tworzenie się stref intensywnego przepływu burzliwego [34, 51]. Jest to szczególnie niepożądane ze względu na rozprzestrzenianie się cząsteczek zanieczyszczeń [51, 57]. Prądy te unoszą bowiem mikroorganizmy i pył w kierunku przeciwnym do przepływu powietrza nawiewanego, i znacznie zakłócają pożądaną kierunek ruchu powietrza [51]. Badania prowadzone przez *Fitznera* (rys.2.36, rys.1.21, rys.1.22) wyraźnie potwierdzają postawione powyższe tezy [123]. Ruchy konwekcyjne wytwarzane są także przez osoby zespołu operującego. Temperatura ich ubrań jest bowiem wyższa od temperatury otoczenia. Dla przykładu można podać, że w spokojnym powietrzu nad głową siedzącej w bezruchu osoby, prądy konwekcyjne wynoszą 0,20 m/s i więcej [34]. Większość badaczy [79] oraz autorów publikacji [5, 30] zgodnie podaje, iż zjawiska konwekcji można opanować dopiero prędkościami rzędu  $0,45 \pm 0,1$  m/s. Podobne są również wymagania

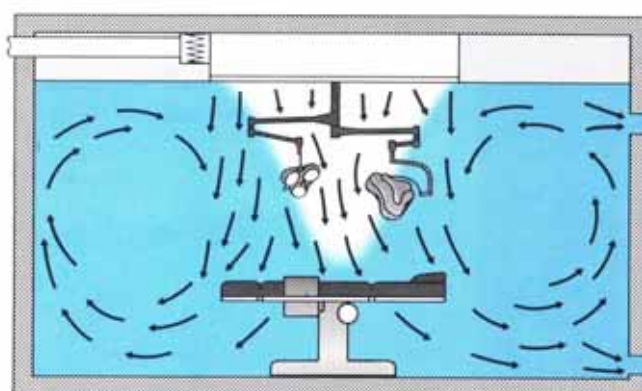


*Rys.2.36 Strumień powietrza laminarnego o prędkości 0,33 m/s nad źródłem ciepła [79]*

amerykańskie [49]. Przy tych prędkościach można jednocześnie zapewnić poprawny komfort cieplny dla osób znajdujących się w pomieszczeniu.

Brak stabilności strugi nawiewnej zauważalny jest także tam, gdzie brak jest lampy bezcieniowej (rys.2.34 i 2.35). Dowodzi to, że już samo usytuowanie filtrów powietrza w nawiewniku (w opinii autora nieprawidłowe, bo nie na całej powierzchni nawiewnej), znacząco wpływa na nierównomierny wypływ powietrza z nawiewnika. Widać to z rys.2.24a.

Na wskutek dużej energii małoturbulentnego strumienia powietrza nawiewanego, na obrzeżach przepływu waporowego, powstaje strefa przejściowa, w której powietrze nawiewane miesza się z powietrzem z pomieszczenia [66] (rys.2.37). Otaczające powietrze z sali zostaje

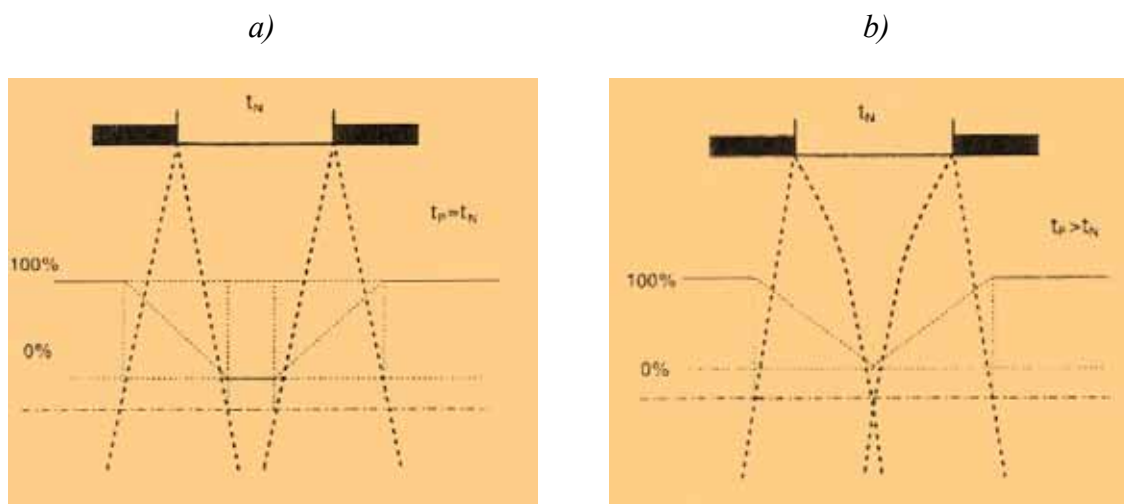


Rys. 2.37 Tworzenie się wirów powietrznych na obrzeżach powietrza wypływającego z sufitowego nawiewnika laminarnego [132]

indukowane (następuje porywanie cząstek otaczającego powietrza), i tworzy się w pobliżu stołu operacyjnego przepływ zwrotny, przeciwny do kierunku nawiewanego powietrza (tj. z dołu do góry). W wyniku przewężenia strugi głównej następuje przyśpieszenie prędkości powietrza pod nawiewnikiem, wraz z oddalaniem się od powierzchni nawiewnej. Proces ten zaobserwowano w obu badanych przypadkach (rys.2.21 i 2.34). Jest ono wynikiem samego niekorzystnego charakteru wypływu powietrza z dużych płaszczyzn perforowanych [80]. To ‘zawężanie’ zależy od prędkości nawiewu powietrza i różnicy temperatur między powietrzem nawiewanym, a powietrzem w pomieszczeniu  $\Delta t$ . Jest tym większe, im większa jest różnica temperatur  $\Delta t$  [66]. W pracy [34], zespół badaczy, pod kierownictwem *St. Przydrożnego*, zalecał w związku z powyższym, ostrożność w stosowaniu tego typu układów. Zjawisko zawężania się strumienia i wpływ temperatury na wielkość ‘sterylnej strefy centralnej’ [37] przedstawiono graficznie na rys.2.38. Na rys.2.38 widoczny jest wpływ temperatury powietrza nawiewanego na kształt strugi nawiewnej [73]. Na pierwszym z rysunków (rys.2.38a) pokazano zachowanie się strumienia izotermicznego; na drugim (rys.2.38b) – nawiew powietrza o temperaturze niższej od temperatury wewnętrznej. W drugim przypadku można zaobserwować, że jego przewężenie nie



przebiega prostoliniowo, tak jak w przypadku strumienia izotermicznego [37]. Następuje krzywoliniowa zmiana, zawężenie następuje znacznie szybciej, prowadząca do jeszcze większego ograniczenia strefy powietrza czystego (rys.2.38). Przedstawiony graficznie efekt sprawia, że do stołu operacyjnego dociera strumień powietrza sterylnego o zbyt małym zasięgu. Powyższe spostrzeżenia potwierdziły przeprowadzone badania, gdzie powietrze nawiewane w bardzo niewielkim tylko stopniu, obejmuje swoim zasięgiem istotny obszar krytyczny (rys.2.19 a i b oraz rys.2.33 a i b). Próbą pokonania tych niekorzystnych zjawisk był sposób nawiewu zaproponowany przez *Allandera*, opisany m.in. w pracy [81]. Wykonane przez tego autora badania, z zastosowaniem podwójnej szczeliny nawiewnej na całym obwodzie nawiewnika laminarnego, wykazały radykalne zmniejszenie zjawiska indukcji wywołanego przez powietrze wewnętrzne, a tym samym wzrost jego czystości w obszarze stołu operacyjnego [30, 34].



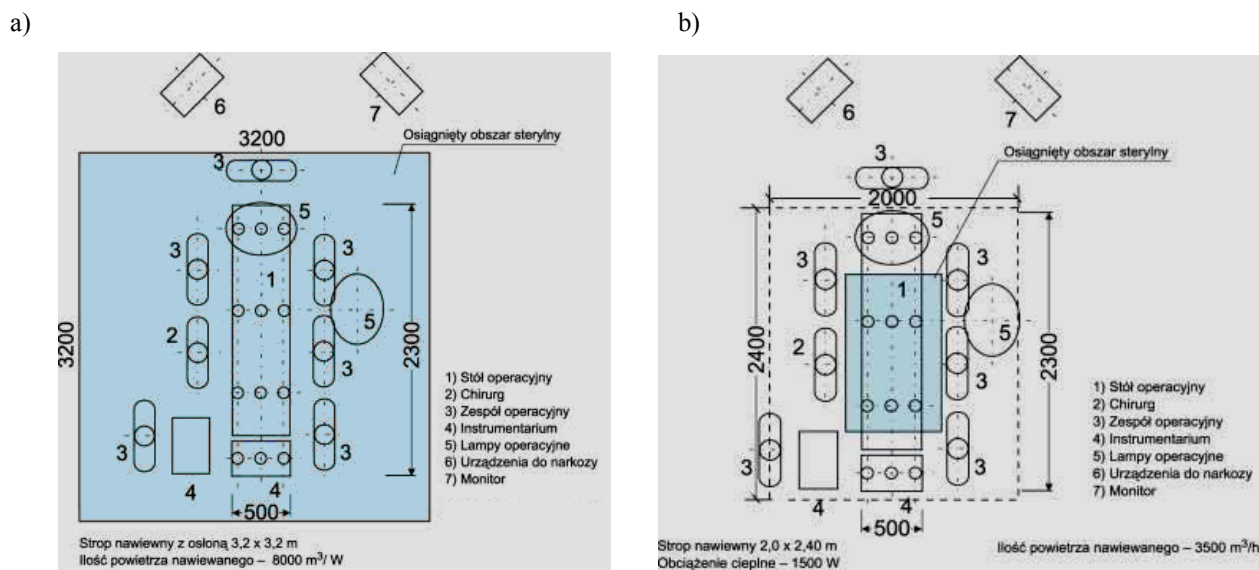
Rys. 2.38 Wpływ laminarnego strumienia powietrza z nawiewnika stropowego: a) o temperaturze równej temperaturze powietrza w pomieszczeniu; b) o temperaturze niższej od temperatury powietrza w pomieszczeniu [50]

Stwierdza się zatem, że klimatyzacja w badanych salach, już nawet w czasie pomiarów wykonywanych w stanie ‘as built’ (pomieszczenie bez wyposażenia i osób), nie spełnia podstawowego zadania, jakim jest utrzymywanie w obszarze krytycznym dostatecznie sterylnych warunków.

#### 4.5.2 Wpływ wielkości sufitu laminarnego na zdolność tworzenia pola sterylnego w strefie chronionej

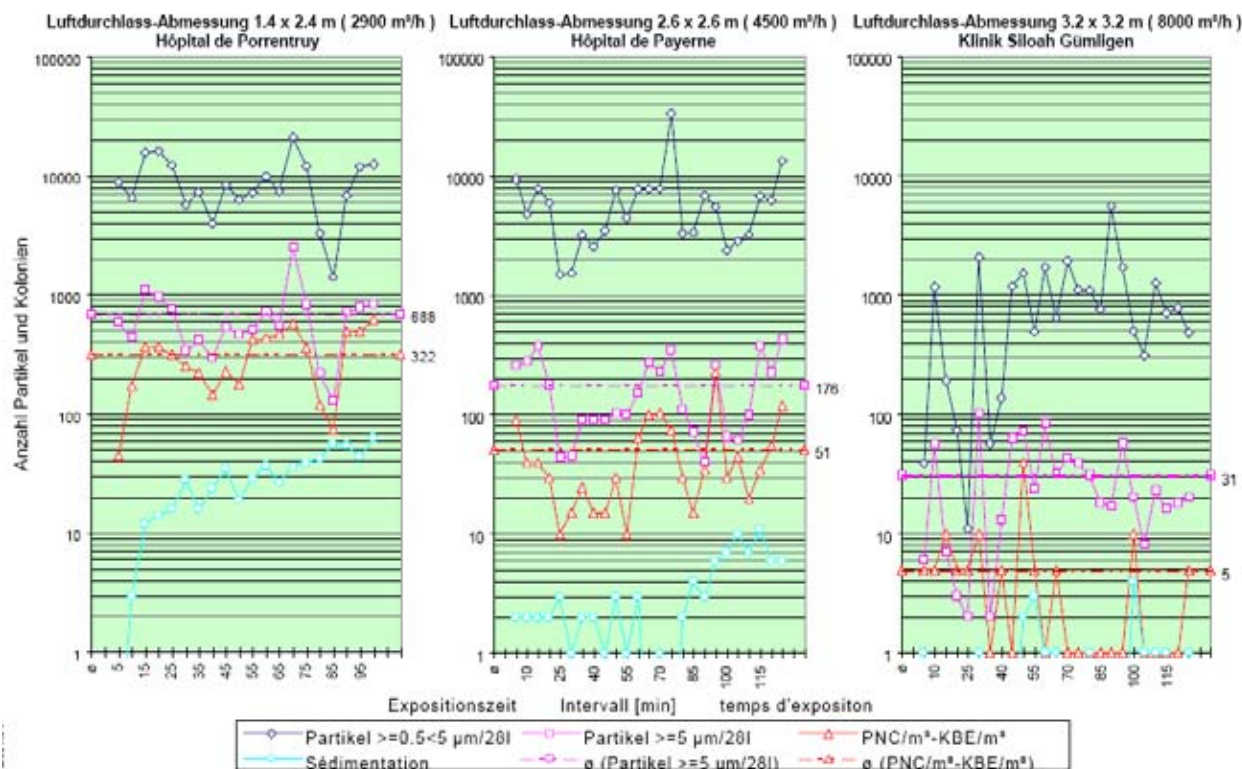
Warunkiem skutecznego działania nawiewnika sufitowego jest wytworzenie laminarnego, sterylnego, zwartego strumienia powietrza nawiewanego. Istotą jest sprowadzenie

go następnie bez zakłóceń, do obszaru krytycznego, a więc do poziomu stołu operacyjnego. Stosowane w zdecydowanej większości przez projektantów tradycyjne stropy laminarne, o wymiarach mniejszych niż 3,0 x 3,0 m, nie stwarzają wymaganej ochronnej strefy powietrza czystego w obrębie obszaru krytycznego [37]. Laminarny strumień powietrza wytworzony przykładowo przez strop nawiewny o wymiarach 1,3 x 2,6 m (Milicz) czy 1,4 x 2,4 m (DCO-Wrocław) zawieszony odpowiednio na wysokości 3,1 i 3,3 m nad posadzką, nie jest w stanie swoim zasięgiem objąć istotnej części stołu operacyjnego. Jedynie zastosowanie stropów o wymiarach większych niż 3,0 x 3,0 m spowoduje omywanie całej strefy krytycznej przez sterylne powietrze nawiewane [37]. Zapisy, określające minimalne wymiary stropów, jako 3,2 x 3,2 m pojawiają się obecnie w normach europejskich (np. szwajcarskiej) [102, 73]. Zwiększenie powierzchni nawiewu wymaga jednak automatycznie większych strumieni powietrza nawiewanego, co pociąga za sobą drastyczne zwiększenie kosztów eksploatacyjnych dotyczących pracy systemu. W celu spełnienia kryterium prędkości przytoczonych w 4.5.1, opisanych w [30, 34, 49, 79] należy przyjmować wydajność powietrza  $V=1600 \text{ m}^3/\text{h}$  przypadającą na  $1\text{m}^2$  stropu. Na rys.2.40 przedstawiono różnice w możliwościach wytworzenia pola sterylnego przez strumień powietrza wypływający z dwóch różnych nawiewników, przy tym samym obciążeniu cieplnym układów. Obszar sterylny dla strumienia powietrza  $V=8000 \text{ m}^3/\text{h}$ , wypływającego ze stropu nawiewnego o wymiarach 3,2x3,2m (rys.2.40a) jest dostatecznie obszerny, a gdy nawiewano tylko  $V=3500 \text{ m}^3/\text{h}$  przez strop o powierzchni 2,0x2,4m (rys.2.40b), wówczas obszar sterylny jest mocno ograniczony i najczęściej niewystarczający.



Rys.2.40 a i b Obszar sterylny (kolor niebieski) osiągnięty na poziomie stołu operacyjnego [73]:  
 a) przy wystarczająco dużym stropie nawiewnym (dodatkowo zastosowano osłony na obwodzie stropu)  
 b) zbyt małym stropie nawiewnym

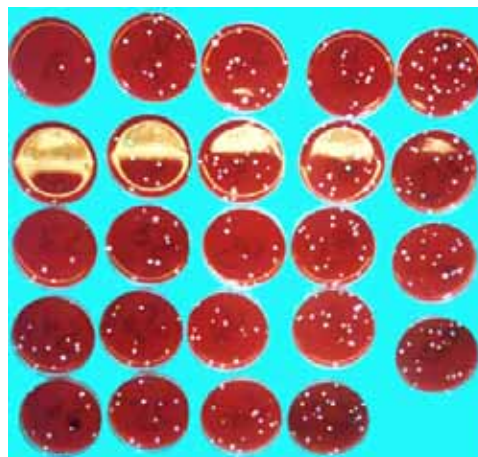
Na wykresach (rys.2.41) przedstawiono wpływ wielkości sufitu laminarnego i ilości powietrza nawiewanego na higieniczny stan powietrza w obrębie stołu z instrumentami chirurgicznymi [82]. Badania prowadzone w trzech różnych salach operacyjnych szpitali w Szwajcarii. Obejmowały nie tylko pomiar cząstek materialnych, ale przede wszystkim liczbę mikroorganizmów. Te ostatnie pobierane były w wyniku metody sedymentacji na agarową pożywkę, a następnie zliczane pod mikroskopem, na podstawie tworzonych przez nie kolonii. Próbkę pobierano ze stolika narzędziowego (rys.2.42), w trakcie prowadzenia zabiegów. Z przedstawionych wykresów (rys.2.41) wynika, iż koncentracja mikroorganizmów jest odwrotnie proporcjonalna do ilości nawiewanego powietrza. W pierwszym z przypadków (nawiewnik o wymiarach 1,2 x 2,4) można z dużym prawdopodobieństwem przypuszczać, że strumień powietrza nawiewanego nie objął swym zasięgiem obszaru zajmowanego przez stół narzędziowy. Wskazuje na to wzrastająca wraz z czasem liczba kolonii, które sedymentowały na płytce laboratoryjnej (rys.2.43). Najkorzystniejsze wyniki osiągnięto tam (jak się spodziewano), gdzie do nawiewu powietrza używano stropu nawiewnego o największych wymiarach, tj. 3,2 x 3,2 m (rys.2.41). Potwierdza to fakt, że wielkość uzyskiwanego obszaru sterylnego wpływa na zmniejszenie koncentracji mikroorganizmów w tym obszarze.



Rys.2.41 Koncentracja mikroorganizmów w próbkach powietrza pobieranych ze stolika narzędziowego, w trakcie przeprowadzania zabiegów, dla trzech sal operacyjnych o różnej wielkości laminarnych stropów nawiewnych [80]



Rys.2.42 Zdjęcie przedstawiające proces pobierania próbek powietrza na jednej z sal operacyjnych, w których prowadzono badania [80]



Rys.2.43 Zdjęcie przedstawiające szkiełka laboratoryjne z pobranym do analizy materiałem badawczym [80]

#### 4.6 PODSUMOWANIE I ETAPU BADAŃ

Wobec stwierdzonych licznych wad, najczęściej stosowanego systemu z nawiewnikami sufitowymi z wpływem laminarnym, takich jak:

- zaburzenie strugi powietrza nawiewanego przez lampy bezcieniowe i personel operujący (tzw. rozbitcie strumienia powietrza nawiewanego);
- zaburzenie strugi powietrza nawiewanej z niską prędkością (0,1 – 0,2m/s) przez występujące prądy konwekcyjne;
- niewłaściwy przepływ powietrza przez pomieszczenie i tworzenie się stref martwych niedostatecznie wentylowanych;
- problemy techniczne – wymagana duża przestrzeń podstropowa na zamontowanie nawiewnika sufitowego (minimalna wysokość sali operacyjnej musi wynosić obecnie 3,0m [Dz.U.Nr 116/2005]);

określono kierunek dalszych badań.

Za cel postawiono opracowanie takiego rozwiązania, które zapewni omywanie sterylnym powietrzem całego obszaru krytycznego w sali operacyjnej, przy możliwie minimalnym strumieniu powietrza nawiewanego.

I tak w Katedrze Klimatyzacji i Ciepłownictwa Politechniki Wrocławskiej powstał autorski projekt, a po nim realizacja pojedynczego, wielkogabarytowego nawiewnika skośnego o kierunkowym wpływie powietrza nawiewanego o nazwie – **SLANtinG**, przewidzianego do zastosowań w salach operacyjnych i zabiegowych.

## **5. KSZTAŁTOWANIE MIKROKLIMATU SAL OPERACYJNYCH Z ZASTOSOWANIEM PROTOTYPOWEGO NAWIEWNIKA SKOŚNEGO W MODELOWEJ SALI OPERACYJNEJ – ETAP II**

### 5.1 ISTOTA DALSZYCH BADAŃ LABORATORYJNYCH

Wnioski i obserwacje z I etapu pracy badawczej, wyznaczyły kierunek dalszych badań. Warunkiem zachowania sterylności powietrza w obszarze stołu operacyjnego jest doprowadzenie do tego obszaru powietrza nawiewanego, klimatyzującego, w jak najmniejszym stopniu zmieszanego z powietrzem sali operacyjnej [30, 34]. Chodzi zatem o takie kształtowanie strugi nawiewnej, aby zminimalizować zjawisko indukcji powietrza z pomieszczenia (celem staje się - przesunięcie efektu rozcieńczenia w stronę efektu wyporu). Sterylne powietrze nawiewane do sali nie powinno na swojej drodze spotkać żadnych przeszkód i kierować się możliwie najkrótszą drogą w obszar stołu operacyjnego [30, 34, 37]. Przewiduje się, że zastosowanie pojedynczego nawiewnika skośnego, nowatorskiej konstrukcji, umożliwi takie kształtowanie strugi powietrza nawiewanego, które zapewni intensywne omywanie obszaru krytycznego sterylnym powietrzem. Bezpośredni nawiew powietrza w obszar chroniony możliwy będzie dzięki odpowiedniemu zawieszeniu nawiewnika w badanej sali. Przewidywane ewentualne zmniejszenie powierzchni nawiewnej, w odniesieniu do nawiewników stropowych laminarnych, da korzystny efekt energetyczny dla proponowanego systemu. Badania II etapu dotyczą kształtowania mikroklimatu sal operacyjnych z zastosowaniem prototypowego nawiewnika skośnego autorskiej konstrukcji.

### 5.2 CEL II ETAPU PRACY BADAWCZEJ

Celem drugiego etapu pracy jest rozwiązanie istoty problemu pracy doktorskiej, tj.

- ✓ Przebadanie i analiza działania prototypowego, autorskiej konstrukcji nawiewnika skośnego. Pozwoli to określić skuteczność zaproponowanego rozwiązania dla celów klimatyzacji sal operacyjnych, w tym:
  - na wyznaczenie najkorzystniejszych parametrów pracy nawiewnika co do jego umiejscowienia (odległości i kąta pochylenia płaszczyzny nawiewnej) względem pola operacyjnego,
  - na określenie optymalnych prędkości nawiewu w funkcji temperatury oraz
  - na ocenę skuteczności działania na tle innych rozwiązań dotychczas stosowanych.

### 5.3 CHARAKTERYSTYKA NAWIEWNIKA AUTORSKIEJ KONSTRUKCJI, (SLANtinG)

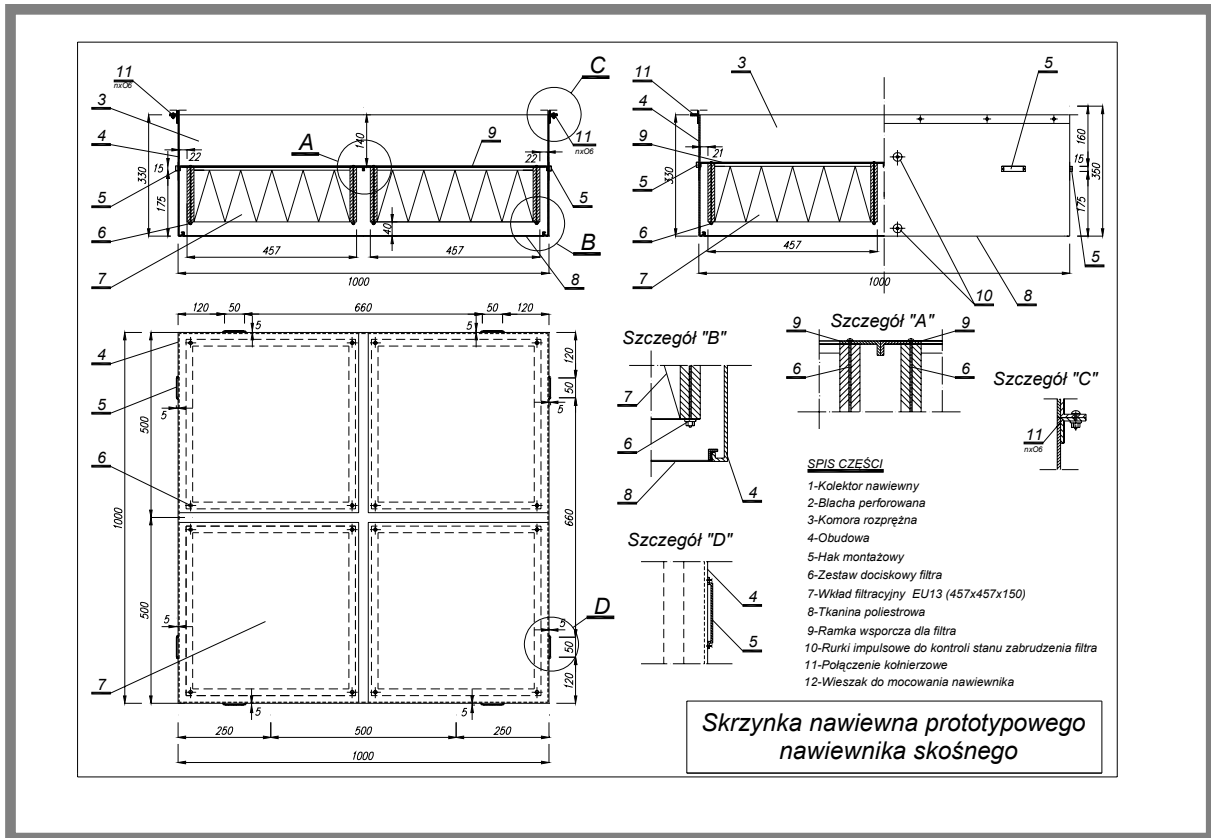
Nawiewnik ten składa się z dwóch części: skrzynki nawiewnej (rys.2.44) oraz kształtki przyłączeniowo-rozprężnej (rys.2.45).

#### **5.3.1 Skrzynka nawiewna**

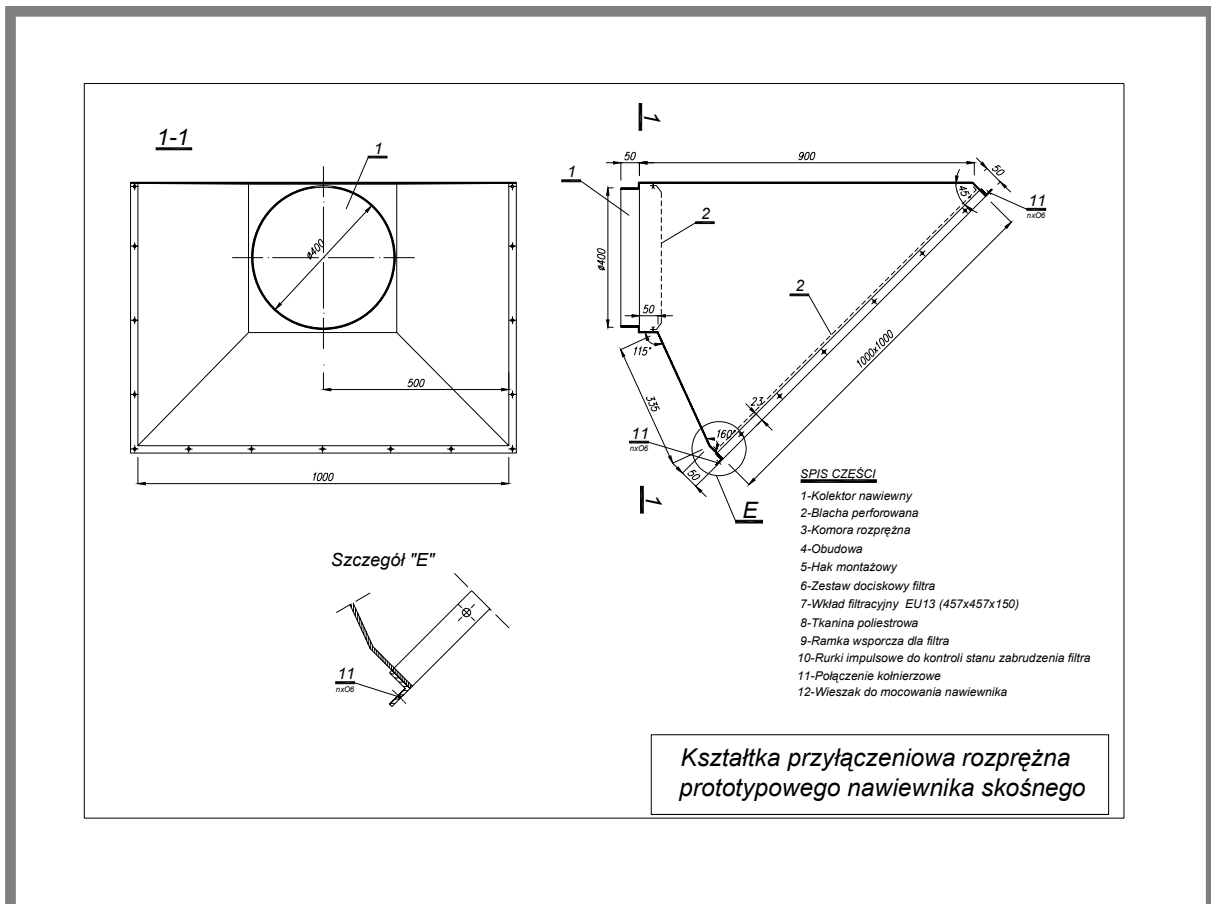
Obudowa skrzynki (4), wykonana docelowo ma być ze stali nierdzewnej (na potrzeby badań wszystkie elementy blacharskie wykonano ze stali ocynkowanej), jako spawana skrzynia ciśnieniowa, szczelna powietrznie o klasie szczelności A (wg Rozporządzenia MI-Dz.U. 02.75.690). Powierzchnie muszą być gładkie i odporne na środki dezynfekcyjne. W skrzynce tej, o wymiarach zewnętrznych 1000 x 1000 mm, umieszczono cztery filtry absolutne HEPA (7), klasy H13 (wg PN-EN 1822), typ FA-150/K o wymiarach 457x457x150 mm. Filtry te oparto na profilach nośnych, stanowiących ramkę wsporczą (9) do montażu i umocowania za pośrednictwem elementów dociskowych (6). Sposób montażu filtrów uwidoczniiony został jako *Szczegół 'A'* i *Szczegół 'B'* na rys.2.44. W obudowie (4) przewidziano króćce do pomiaru różnicy ciśnienia i do kontroli osadzenia filtrów. Łatwo i szybko demontowalne filtry stanowią właściwą płaszczyznę nawiewu oraz pełnią funkcję laminaryzatora. Możliwe jest alternatywne rozwiązanie płaszczyzny nawiewu, w formie ramy z naciągniętą włókniną poliestrową (8). W trakcie realizowanej pracy nie udało się jednak pozyskać takiej włókniny i rozwiązanie to nie stanowiło przedmiotu badań. Po obu stronach obudowy przewidziano specjalne miejsca służące zamocowaniu skrzyni do dwuteowników, tworzących ramę i konstrukcję nośną dla nawiewnika. Dwuteowniki zostały zakotwione w ścianie. Zdjęcie w rys.2.47 przedstawia w sposób poglądowy schemat zawieszenia badanego nawiewnika w sali laboratoryjnej. Powyższy opis i numeracja elementów dotyczy rys.2.44.

#### **5.3.2 Kształtka przyłączeniowa rozprężna**

Połączenie właściwego elementu nawiewnego (rys.2.44) do instalacji nawiewnej, możliwe jest przy użyciu kształtki przyłączeniowej rozprężnej (rys.2.45). Służyć ma ona przede wszystkim do zapewnienia równomiernego napływu powietrza na całą powierzchnię filtrów absolutnych. Celem realizacji powyższego zastosowano ponadto dwie wyrównawcze przesłony perforowane. Pierwsza (2a) - tuż za wlotem powietrza, druga (2b) - równoległa do płaszczyzny filtrów absolutnych (patrz rys.2.45). Element (11) stanowi ramkę wraz z połączeniem kołnierзовym, służącym podłączeniu skrzynki nawiewnej, skręcanych razem za pośrednictwem śrub mocujących, na neoprenową uszczelkę - *Szczegół 'C'* (rys.2.44). Powietrze do nawiewnika doprowadzane jest kolektorem nawiewnym (1) o średnicy przyłącza  $\varnothing 400$  mm. Powyższy opis i numeracja elementów dotyczy rys.2.45.

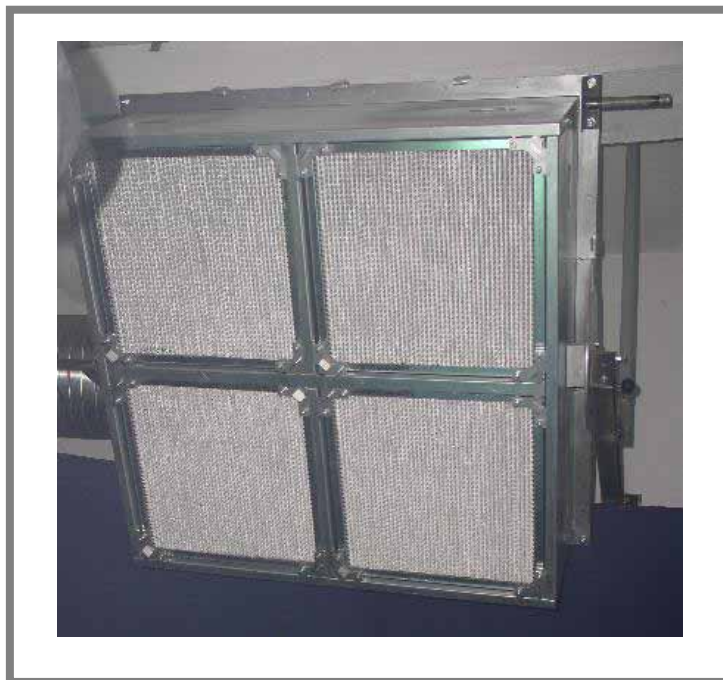


Rys. 2.44 Rysunek konstrukcyjny skrzynki nawiewnej prototypowego nawiewnika skośnego - SLANtinG



Rys. 2.45 Rysunek konstrukcyjny kształtki przyłączeniowej rozprężnej prototypowego nawiewnika skośnego - SLANtinG

Fotografie w rys.2.46 i rys.2.47 przedstawiają prototyp nawiewnika SLANtinG, umieszczony na stanowisku badawczym w modelowej sali operacyjnej.



Rys. 2.46 Widok od czola nawiewnika SLANtinG



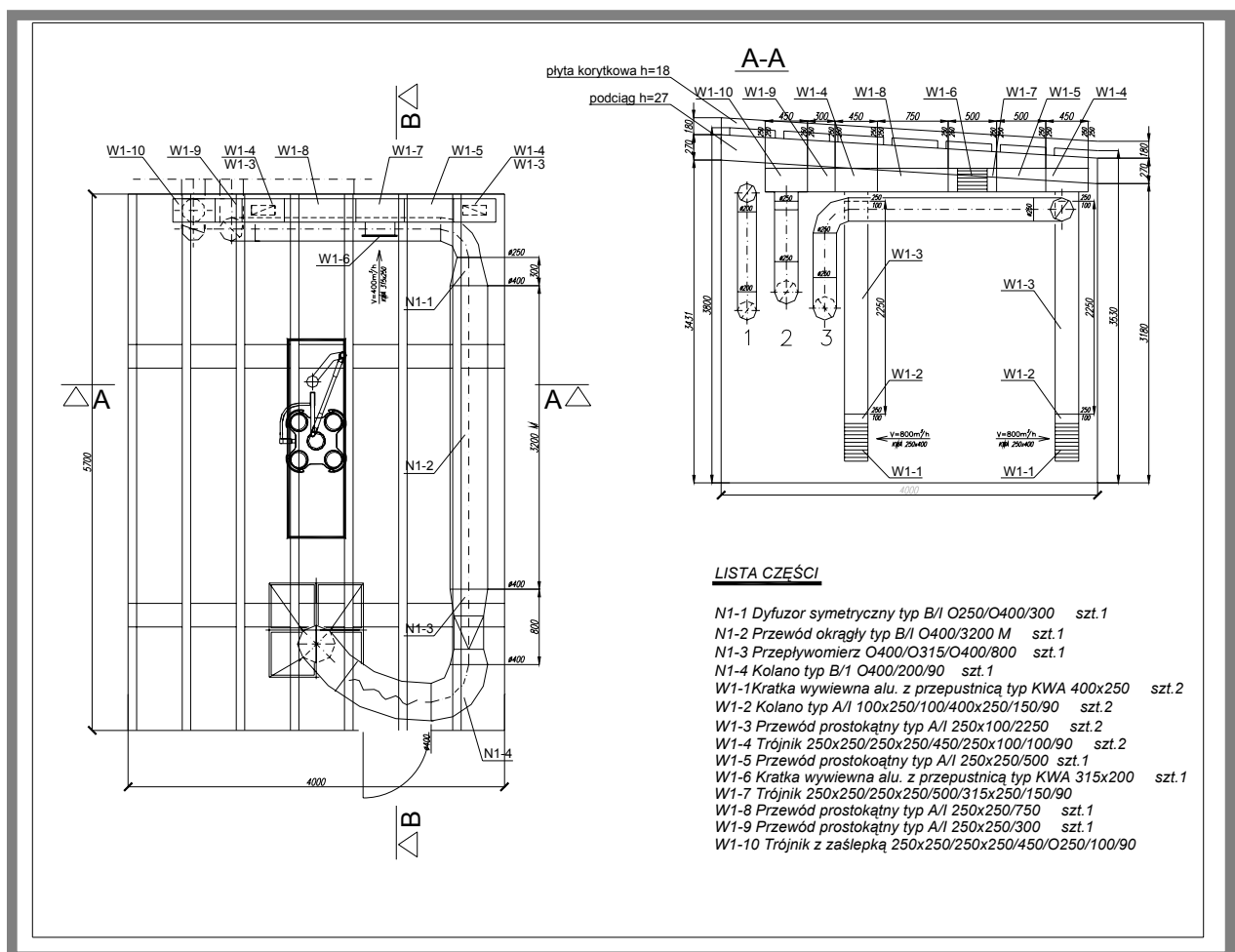
Rys.2.47 Nawiewnik SLANtinG na stanowisku laboratoryjnym; widoczny jest przewód, doprowadzający powietrze do nawiewnika oraz załączona lampa bezcieniowa



## 5.4 STANOWISKO BADAWCZE ORAZ POMIAR PODSTAWOWYCH PARAMETRÓW

### 5.4.1 Opis stanowiska

Badania prowadzone były w wydzielonym pomieszczeniu Katedry Klimatyzacji i Ciepłownictwa - pomieszczenie nr 401, w budynku C6 Politechniki Wrocławskiej. Modelowe pomieszczenie odpowiada typowej sali operacyjnej, zwłaszcza w zakresie (dla naszych badań najistotniejszych: długości - 5,70m i wysokości - od 3,50m do 3,80m), jak na rys.2.48. Szerokość pomieszczenia wynosi 4,00m. Laboratorium, w którym przeprowadzano badania jest częściowo izolowane termicznie. Jedynie stropodach jest przegrodą zewnętrzną. Stropodach tworzą płyty korytkowe, podtrzymywane na dwóch belkach, przebiegających wzdłuż długości pomieszczenia. Rzut i przekrój pomieszczenia przedstawia rys.2.48. Z istotnych danych technicznych należy wymienić, że nawiewnik zamocowany był na ruchomej tulei obrotowej (umożliwiającej zmianę jego pochylenia), na wysokości  $H_{min.} = 2,20$  m nad posadzką (dolna krawędź), w odległości 1,25m od ściany, widocznej na fotografii w rys.2.47. Sposób umocowania nawiewnika widoczny jest na przekroju B-B (w rys.2.49).



Rys. 2.48 Rzut oraz przekrój A-A pomieszczenia laboratoryjnego, w którym prowadzono badania wraz z kluczowymi elementami wyposażenia oraz instalacją nawiewną i wywiewną

Nad modelowym stołem operacyjnym o wymiarach 600 x 2000 mm, o wysokości  $h=0,8$  m nad posadzką) zawieszona została wielo-reflektorowa lampa bezcieniowa o czaszy pięcio-projektorowej, typu *HANAULUX 2005*, firmy *HERAEUS* [143]. Wydajność lampy wynosiła 140 000 Luxów na odległości 1m, przy łącznej mocy pięciu żarówek, równej 200 [W]. Lampę wypożyczono dzięki uprzejmości firmy *KENDROMED Sp. z o.o.* z Wrocławia, zajmującej się sprzedażą i produkcją sprzętu medycznego. Została umieszczona w ściśle określonym miejscu (na przecięciu obu osi symetrii stołu), z dolną krawędzią na wysokości 1,8m nad posadzką (*rys.2.47, 2.48 i 2.49*) i nie przemieszczano jej w trakcie przeprowadzania wszystkich pomiarów.

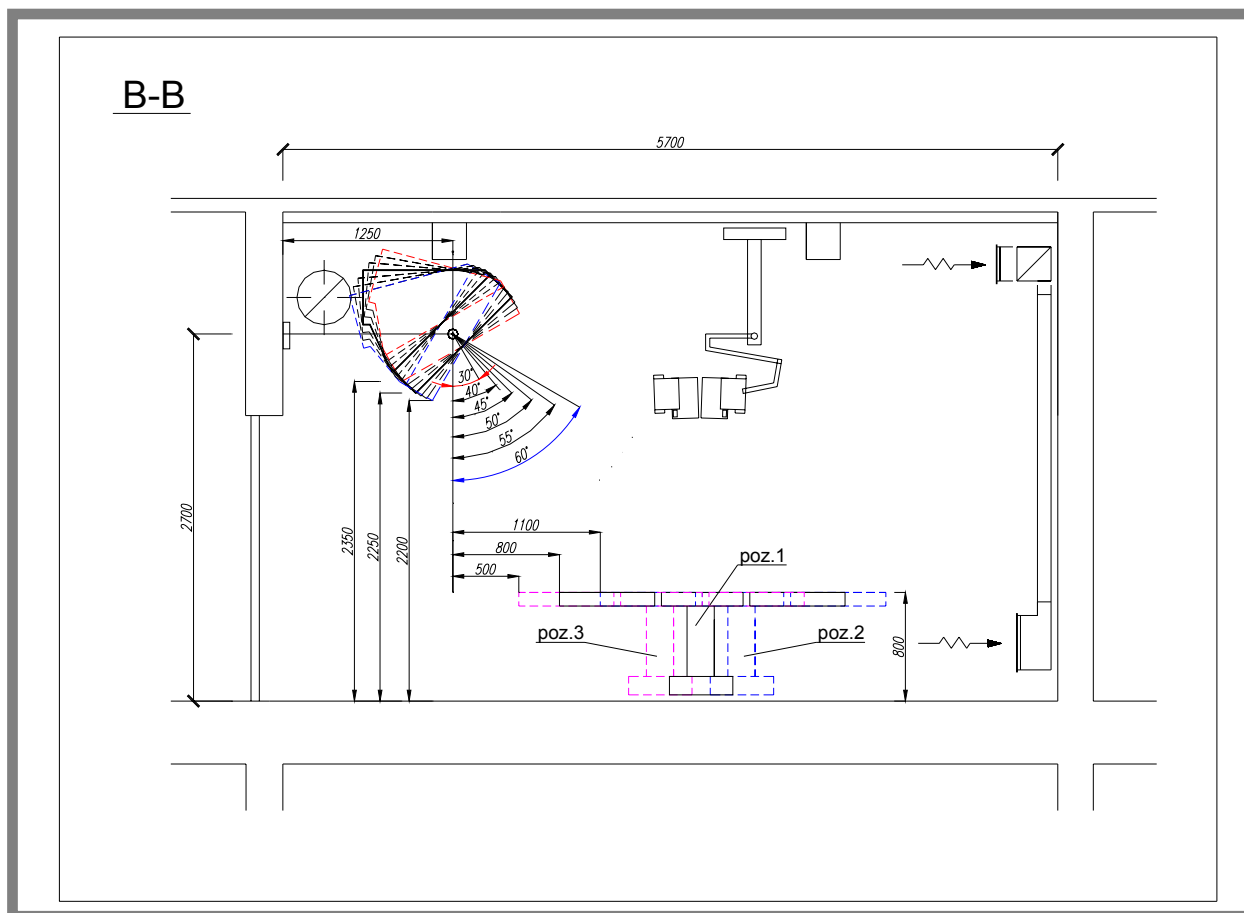
#### 5.4.2 Rozpoznanie zjawisk przepływu powietrza

Wstępne pomiary, pozwoliły na selekcję badanych przypadków. Ustalono stopniowanie kąta pochylenia nawiewnika co  $15^0$ , gdyż nie zauważono znaczących zmian w rozkładzie prędkości i temperatur powietrza z mniejszymi pochyleniami. Stosowanie większych strumieni powietrza nawiewanego niż  $1800 \text{ m}^3/\text{h}$  - okazało się niecelowe gdyż prędkości w obszarze stołu operacyjnego przekraczały wtedy znacznie wartość  $0,50 \text{ m/s}$ . W związku z tym, iż wg literatury ([66]) brak jest dominującego wpływu różnicy temperatury  $\Delta t$  na rozkład prędkości przepływu powietrza w pomieszczeniu (badania dla pomieszczeń czystych wykonane przez *J. Halupczoka*) [66] ograniczono się do prowadzenia badań w warunkach zbliżonych do izotermicznych. Różnica pomiędzy temperaturą powietrza nawiewanego oraz w badanej sali, nie przekraczała  $\Delta t = 1,0 \text{ K}$ .

#### 5.4.3 Opis badanych wariantów

Najbardziej szczegółowo przebadano nawiewnik ze strumieniami powietrza klimatyzującego, równymi:  $1400 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $1600 \text{ m}^3/\text{h}$  i  $1800 \text{ m}^3/\text{h}$ ; o kątach pochylenia nawiewnika:  $30^0$ ,  $45^0$ ,  $60^0$  (do płaszczyzny stołu operującego) oraz dla trzech różnych odległości stołu operacyjnego od osi nawiewnika: poz.1 – 800 mm, poz.2 – 1100 mm, poz.3 – 500 mm. (mierzone od osi obrotu nawiewnika do krawędzi stołu operacyjnego), (*rys.2.49*). Układ został przebadany w trzech podstawowych wersjach. Pod pojęciem ‘wersja’ należy rozumieć sposób nawiewania powietrza (kąt pochylenia nawiewnika do płaszczyzny stołu operacyjnego). Każda wersja badana była w kilku wariantach, różniących się ilością doprowadzanego powietrza oraz miejscem usytuowania modelowego stołu operacyjnego. Dla przykładu: (30)\_1400\_1, należy rozumieć, że liczba w nawiasie oznacza kąt pochylenia nawiewnika (dana wersja), a kolejne liczby - ‘1400’ określa strumień powietrza nawiewanego w  $\text{m}^3/\text{h}$ ; zaś ‘1’ pozycję zajmowaną przez stół, co zaznaczono na przekroju B-B pomieszczenia w *rys.2.49*. W sumie przebadano i poddano szczegółowej analizie trzy wersje, każda miała po dziewięć wariantów. Co daje 27 sesji

pomiarowych. Dla każdej przeprowadzono dokładne pomiary temperatur i prędkości powietrza. Zadaniem badań w poszczególnych wersjach i wariantach był wybór optymalnych strumieni powietrza oraz najkorzystniejszego sposobu nawiewu (kąta pochylenia nawiewnika do płaszczyzny stołu operacyjnego).



Rys. 2.49 Przekrój B-B podłużny przez pomieszczenie laboratoryjne w którym prowadzono badania z kluczowymi elementami wyposażenia; zaznaczono różne pozycje zajmowane przez stół oraz kąty pochylenia nawiewnika

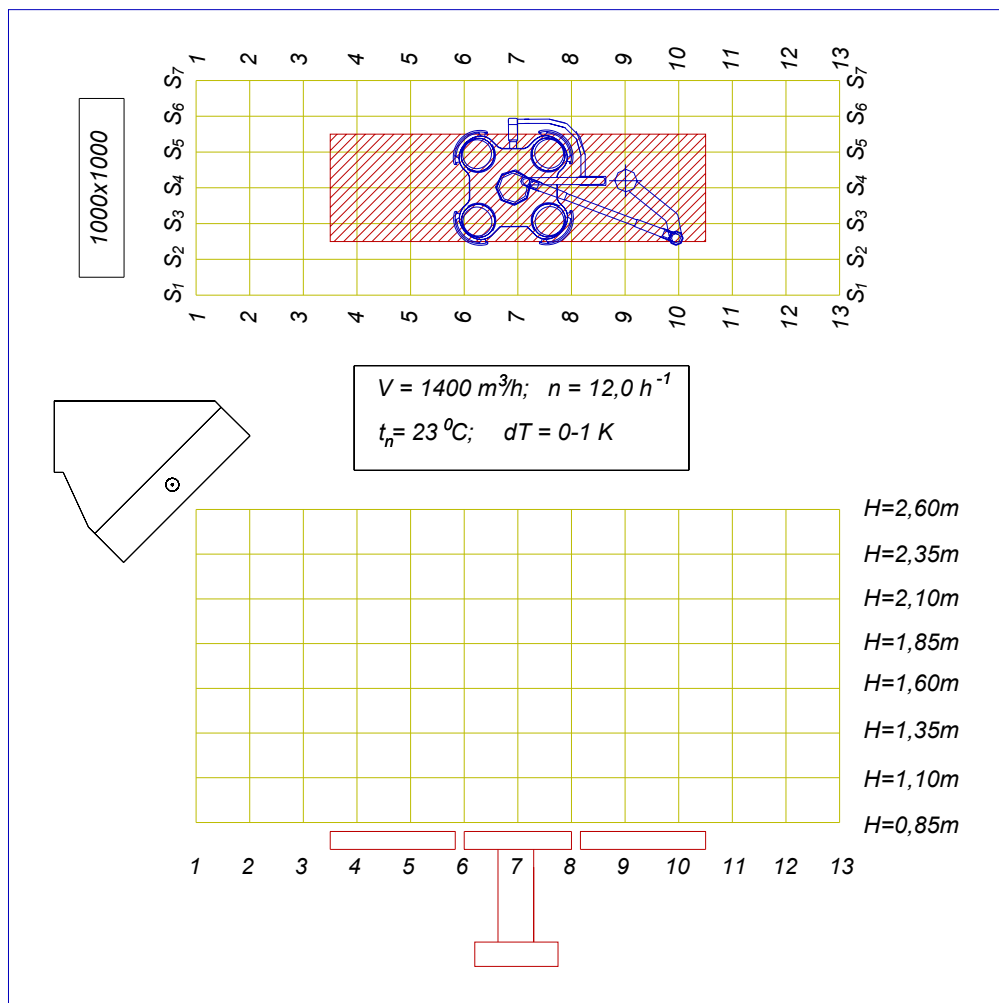
#### 5.4.4 Parametry pomiarowe oraz metodyka badań

Zaproponowano metodykę badań taką samą, jak opisana w rozdz.4.2, z tą tylko różnicą, że pomiar wykonywano teraz równocześnie przy użyciu ośmiu, a nie jak wcześniej – czterech sond pomiarowych. Zakup dodatkowych sond możliwy stał się dzięki pozyskaniu środków finansowych z KBN-u (uzyskano grant promotorski o nr 4T07E 029 27).

Instalacja powietrzna stanowiska badawczego składa się z części nawiewnej i wywiewnej. Powietrze zewnętrzne uzdatniane jest w centrali wentylacyjnej (firmy PWPO-T PROMONT ze Świebodzic (8) rys.2.51), a następnie transportowane do pomieszczenia sali operacyjnej (instalacja N1 z rys.2.48) i nawiewane przez pojedynczy opisany wyżej nawiewnik

skośny. Strumień powietrza wywiewanego stanowi 80% powietrza nawiewanego, w pomieszczeniu zachowane jest nadciśnienie. Nadciśnienie wynosić ma + 20%. Powietrze usuwane jest z pomieszczenia kratkami zlokalizowanymi w górnej i dolnej części pomieszczenia. Górą - jedna kratka wywiewna (W1-6) typu KWA o wymiarach 315x200 oraz dołem - dwie kratki wywiewne (W1-1), typu KWA o wymiarach 400x250. Na rys.2.51 przedstawiono schemat ideowy opisywanego stanowiska pomiarowego.

Po uruchomieniu stanowiska stabilizacja warunków cieplnych następowała po upływie ok. 2h. Zwykle obserwowano wzrost temp. powietrza w pomieszczeniu o ok.  $1^{\circ}\text{C}/1\text{h}$ . Gdy proces pomiarowy nie był niczym zakłócany, pomiar całego wariantu trwał ok. 5h. Po przesunięciu statywu z umocowanymi do niego sondami, odczytu dokonywano po ok. 3 min. Tak krótki okres czasu możliwy był ze względu na małą bezwładność używanych sond termodynamometrycznych i wynikał wyłącznie z potrzeby opanowania drgań statywu pomiarowego oraz wirów powietrznych wytworzonych przez przemieszczającego się badacza.



Rys. 2.50 Lokalizacja nawiewnika skośnego względem siatki pomiarowej, widok z góry oraz z boku; zaznaczony na czerwono modelowy stół operacyjny oraz lampa bezcieniowa

Pomiary prowadzono w ośmiu poziomych płaszczyznach pomiarowych. Każda zawiera 91 punktów rozmieszczonych jak na *rys.2.50*, w odstępach 30 i 20 cm. Łącznie daje to 728 punktów pomiarowych. W prostokącie o wymiarach 360 x 120 mm, numeracja odpowiednio od 1-13 (po długości) oraz od S1-S7 (po szerokości). Przeprowadzono pomiary prędkości oraz temperatur powietrza w strugach nawiewnych w różnych odległościach od płaszczyzny nawiewnej w ośmiu pionowych płaszczyznach pomiarowych, na wysokościach: 2,60 m; 2,35 m; 2,10 m; 1,85 m; 1,60 m; 1,35 m; 1,10 m; 0,85 m nad posadzką, w obrębie działania nawiewnika skośnego (*rys.2.50*). W pomieszczeniu znajdowała się jedna osoba prowadząca pomiary.

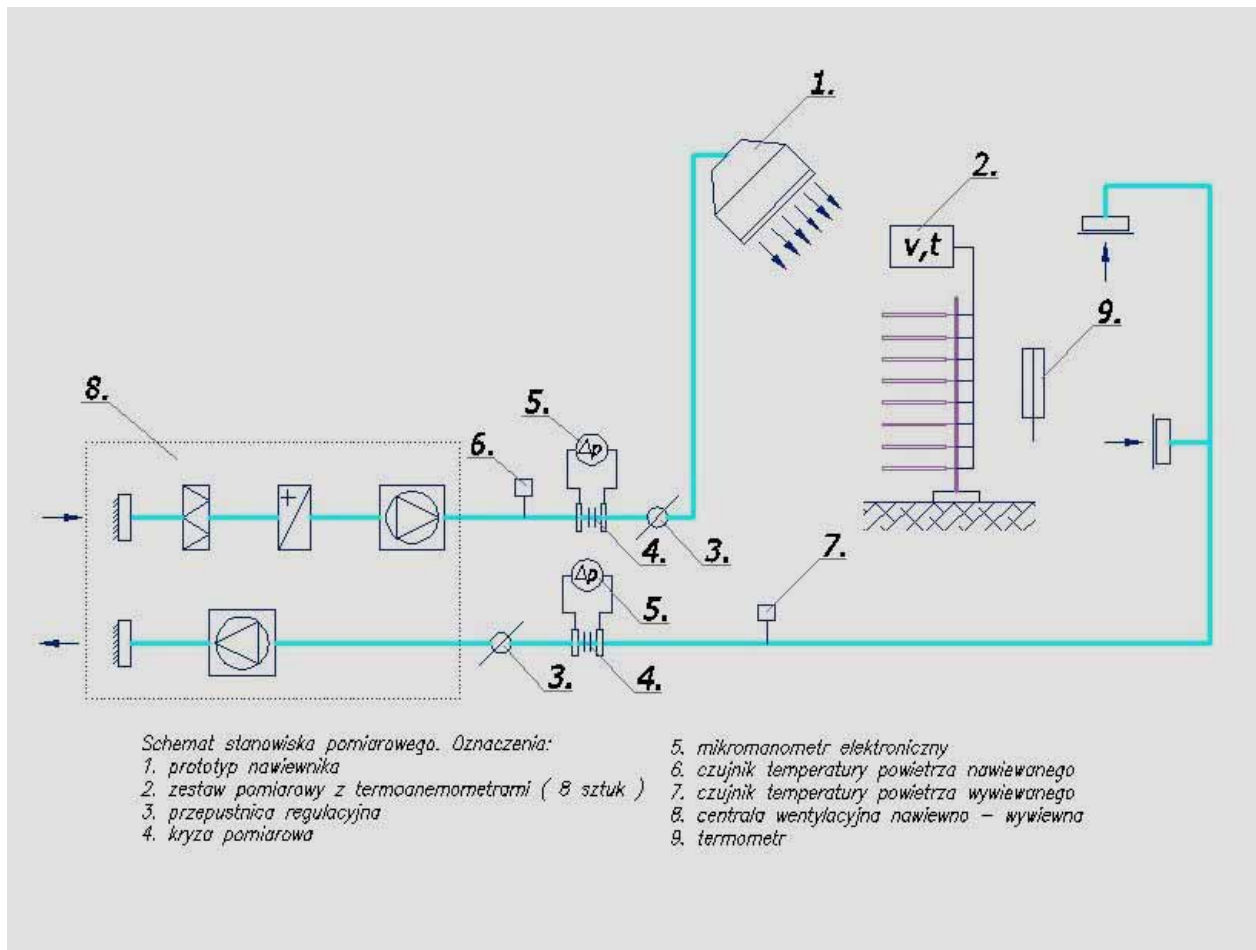
#### **5.4.5 Pomiar podstawowych wielkości mierzonych** (powołane w tekście numery odnoszą się do *rys.2.51*)

##### 5.4.5.1 Pomiar przepływu strumienia powietrza nawiewanego i wywiewanego

Do określenia strumieni powietrza nawiewanego i wywiewanego stosowano kryzy pomiarowe z przytarczowymi otworami impulsowymi (4). Kryzy pomiarowe obliczone i wykonane zostały zgodnie z obowiązującą Normą (PN-EN ISO 5167-2: 2005 'Pomiary strumienia płynu za pomocą zwężek pomiarowych wbudowanych w całkowicie wypełnione rurociągi o przekroju kołowym -część 2: Kryzy') [144]. Średnica zewnętrzna kryzy wynosiła  $D = 248$  mm, a średnica wewnętrzna  $d = 185$  mm. Odczytu spadku ciśnienia dokonywano przy użyciu sondy do pomiaru ciśnienia różnicowego typ TESTO 0638.1445, podłączonej do precyzyjnego wielofunkcyjnego przyrządu pomiarowego typu TESTO 400 z wyświetlaczem oraz na U-rurkach. Dokładność pomiaru ciśnienia wynosiła  $\pm 2$  Pa. Regulację ilości powietrza przeprowadzono przy użyciu przepustnic wielopłaszczyznowych, a wstępnie - za pomocą wymiany kół pasowych, przy silnikach wentylatorów.

##### 5.4.5.2 Pomiar temperatur powietrza nawiewanego i wywiewanego z pomieszczenia

Temperatury powietrza nawiewanego (6) i wywiewanego (7) mierzono za pomocą czujników temperatury QAM22. Zakres działania czujników to:  $-20 \div +100$  °C. Wartości odczytywano z wyświetlacza na regulatorze sterującym pracą nagrzewnicy centrali typu RWX62.7034. Opisane urządzenia automatyki są firmy SIEMENS. Temperaturę powietrza w pomieszczeniu porównywano ponadto za pomocą termometru rtęciowego (9) o zakresie pomiarowym  $0 \div +50$  °C i podziałce  $0,2$  °C.



Rys. 2.51 Schemat ideowy stanowiska

#### 5.4.5.3 Pomiar prędkości powietrza oraz temperatur w obrębie działania nawiewnika skośnego

Pomiary prowadzono równocześnie przy użyciu ośmiu sond pomiarowych (do pomiaru w zakresie niskich prędkości) z wysięgnikiem teleskopowym. Do odczytu mierzonych wartości używano dwa rejestratory (logger'y) z czterema wejściami każdy, zasilanych wspólną skrzynką zasilającą, typ PowerBox. Rejestratory połączono w szereg, a następnie odnotowane pomiary przesyłane były poprzez kartę sieciową - PCMCIA, do komputera. Korzystano z oprogramowania COMSOFT ver.3.4/SP1 (rys.2.51a) z licencją firmy TESTO oraz arkusza kalkulacyjnego Microsoft Excel (rys.2.60). Zakres działania sond i dokładność przeprowadzonych pomiarów, opisano w rodz.4.2. Na schemacie (rys.2.51) zaznaczono statyw z sondami pomiarowymi (2).

rafik	Date	Time	[m/s]...	[°C]...	[m/s]...	[°C]...	[m/s]...	[°C]...	[m/s]...	[°C]...	[m/s]...	[°C]...	[m/s]...	[°C]...		
265	2005-05-16	21:52:16	0,47	23,57	0,20	23,30	0,11	23,23	0,02	23,41	0,02	23,60	0,03	23,55	0,02	23,5
266	2005-05-16	21:52:18	0,51	23,57	0,23	23,29	0,11	23,22	0,01	23,41	0,02	23,69	0,02	23,55	0,03	23,5
267	2005-05-16	21:52:20	0,43	23,58	0,23	23,29	0,10	23,22	0,02	23,40	0,01	23,68	0,03	23,55	0,05	23,5
268	2005-05-16	21:52:22	0,45	23,58	0,24	23,29	0,10	23,22	0,02	23,40	0,01	23,68	0,04	23,55	0,06	23,5
269	2005-05-16	21:52:24	0,39	23,58	0,23	23,29	0,10	23,21	0,02	23,40	0,01	23,68	0,05	23,55	0,08	23,5
270	2005-05-16	21:52:26	0,43	23,57	0,29	23,29	0,11	23,21	0,01	23,39	0,01	23,68	0,05	23,55	0,06	23,5
271	2005-05-16	21:53:10	0,46	23,50	0,24	23,26	0,08	23,10	0,09	23,30	0,09	23,50	0,10	23,45	0,12	23,4
272	2005-05-16	21:53:11	0,43	23,50	0,28	23,26	0,05	23,10	0,08	23,30	0,07	23,49	0,09	23,44	0,10	23,4
273	2005-05-16	21:53:13	0,38	23,50	0,29	23,26	0,09	23,10	0,06	23,30	0,07	23,40	0,07	23,44	0,09	23,4
274	2005-05-16	21:53:16	0,36	23,50	0,32	23,26	0,13	23,19	0,08	23,30	0,08	23,48	0,07	23,44	0,08	23,4
275	2005-05-16	21:53:17	0,41	23,50	0,32	23,27	0,16	23,19	0,09	23,30	0,06	23,47	0,08	23,44	0,07	23,4
276	2005-05-16	21:53:20	0,38	23,50	0,33	23,27	0,20	23,19	0,10	23,30	0,05	23,48	0,06	23,44	0,07	23,4
277	2005-05-16	21:53:21	0,38	23,49	0,35	23,27	0,19	23,19	0,08	23,30	0,04	23,48	0,05	23,45	0,06	23,4
278	2005-05-16	21:53:23	0,40	23,40	0,35	23,28	0,13	23,19	0,05	23,30	0,03	23,40	0,03	23,45	0,08	23,4
279	2005-05-16	21:53:25	0,38	23,49	0,31	23,28	0,11	23,19	0,03	23,30	0,02	23,48	0,03	23,45	0,08	23,4
280	2005-05-16	21:53:27	0,39	23,49	0,32	23,28	0,12	23,19	0,03	23,30	0,02	23,40	0,04	23,46	0,09	23,4
281	2005-05-16	21:54:36	0,07	23,75	0,04	23,30	0,03	23,20	0,18	23,22	0,77	23,62	0,79	23,66	0,58	23,3
282	2005-05-16	21:54:38	0,08	23,77	0,05	23,39	0,04	23,21	0,14	23,22	0,77	23,61	0,79	23,66	0,52	23,3
283	2005-05-16	21:54:40	0,08	23,80	0,04	23,40	0,04	23,21	0,11	23,22	0,74	23,61	0,79	23,67	0,51	23,3
284	2005-05-16	21:54:42	0,09	23,83	0,04	23,41	0,03	23,21	0,11	23,22	0,76	23,61	0,79	23,67	0,50	23,3
285	2005-05-16	21:54:44	0,06	23,88	0,02	23,42	0,03	23,21	0,11	23,22	0,77	23,61	0,79	23,67	0,55	23,3
286	2005-05-16	21:54:46	0,05	23,91	0,01	23,43	0,03	23,22	0,10	23,22	0,78	23,62	0,79	23,68	0,58	23,3
287	2005-05-16	21:54:48	0,04	23,92	0,01	23,44	0,03	23,22	0,13	23,21	0,79	23,62	0,79	23,68	0,56	23,3
288	2005-05-16	21:54:50	0,05	23,93	0,01	23,45	0,04	23,22	0,15	23,21	0,76	23,62	0,79	23,68	0,55	23,3
289	2005-05-16	21:54:52	0,05	23,92	0,01	23,46	0,04	23,22	0,18	23,21	0,76	23,62	0,79	23,69	0,56	23,3
290	2005-05-16	21:54:54	0,05	23,91	0,02	23,46	0,03	23,22	0,18	23,20	0,75	23,62	0,79	23,69	0,57	23,3
291	2005-05-16	21:56:06	0,03	23,54	0,06	23,31	0,46	23,23	0,71	23,51	0,77	23,74	0,76	23,69	0,83	23,8
292	2005-05-16	21:56:08	0,04	23,53	0,07	23,31	0,42	23,22	0,71	23,52	0,77	23,74	0,77	23,68	0,84	23,8
293	2005-05-16	21:56:10	0,03	23,53	0,09	23,31	0,39	23,22	0,71	23,52	0,76	23,74	0,78	23,68	0,84	23,8
294	2005-05-16	21:56:12	0,04	23,52	0,08	23,31	0,38	23,22	0,72	23,52	0,77	23,74	0,77	23,68	0,82	23,8
295	2005-05-16	21:56:14	0,04	23,52	0,08	23,30	0,37	23,21	0,73	23,53	0,77	23,74	0,78	23,68	0,83	23,8
296	2005-05-16	21:56:16	0,04	23,52	0,04	23,30	0,33	23,21	0,72	23,54	0,78	23,75	0,77	23,68	0,83	23,8
297	2005-05-16	21:56:18	0,03	23,51	0,04	23,30	0,24	23,20	0,72	23,54	0,78	23,75	0,77	23,68	0,84	23,8
298	2005-05-16	21:56:20	0,04	23,51	0,04	23,30	0,21	23,20	0,73	23,55	0,78	23,75	0,78	23,68	0,84	23,8
299	2005-05-16	21:56:22	0,04	23,50	0,04	23,30	0,20	23,20	0,71	23,55	0,78	23,76	0,78	23,68	0,85	23,8
300	2005-05-16	21:56:24	0,04	23,50	0,03	23,30	0,16	23,20	0,72	23,56	0,78	23,76	0,78	23,68	0,84	23,8
301	2005-05-16	21:57:36	0,24	23,37	0,53	23,39	0,67	23,45	0,71	23,65	0,75	23,79	0,74	23,76	0,30	23,5
302	2005-05-16	21:57:37	0,27	23,36	0,53	23,39	0,68	23,45	0,71	23,65	0,77	23,79	0,81	23,77	0,26	23,5
303	2005-05-16	21:57:39	0,38	23,36	0,52	23,39	0,67	23,44	0,71	23,66	0,76	23,80	0,76	23,77	0,20	23,5
304	2005-05-16	21:57:41	0,35	23,35	0,53	23,39	0,66	23,44	0,71	23,67	0,76	23,80	0,75	23,77	0,16	23,5
305	2005-05-16	21:57:43	0,35	23,35	0,52	23,40	0,67	23,44	0,70	23,67	0,75	23,81	0,76	23,76	0,16	23,5
306	2005-05-16	21:57:45	0,39	23,35	0,50	23,40	0,68	23,44	0,72	23,68	0,75	23,81	0,77	23,76	0,16	23,5
307	2005-05-16	21:57:47	0,36	23,35	0,43	23,40	0,69	23,45	0,71	23,69	0,76	23,81	0,79	23,76	0,15	23,5
308	2005-05-16	21:57:49	0,38	23,34	0,47	23,40	0,69	23,46	0,72	23,68	0,76	23,82	0,76	23,77	0,20	23,5
309	2005-05-16	21:57:51	0,33	23,34	0,47	23,40	0,69	23,46	0,72	23,68	0,75	23,82	0,76	23,76	0,25	23,5
310	2005-05-16	21:57:53	0,31	23,34	0,51	23,40	0,71	23,46	0,73	23,69	0,74	23,82	0,78	23,76	0,29	23,5
311	2005-05-16	21:58:29	0,23	23,51	0,59	23,58	0,70	23,61	0,67	23,71	0,65	23,67	0,22	23,63	0,17	23,4
312	2005-05-16	21:58:30	0,25	23,52	0,59	23,58	0,70	23,62	0,69	23,71	0,67	23,66	0,17	23,62	0,16	23,4
313	2005-05-16	21:58:32	0,25	23,53	0,59	23,59	0,69	23,62	0,69	23,71	0,65	23,65	0,23	23,61	0,14	23,5

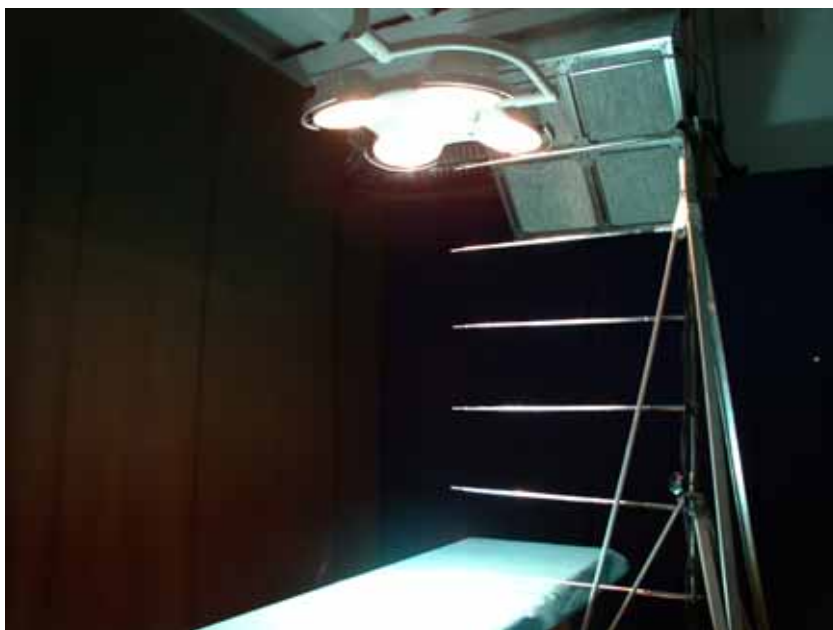
Rys. 2.51a Zdjęcie ekranu przedstawiające wzór tabeli pomiarowej programu COMSOFT ver.3.4/SP1

#### 5.4.5.4 Pomiar oporów nawiewnika

Pomiar prowadzono urządzeniem typ TESTO 0638.1445 opisanym wcześniej w pkt.5.4.5.1.

#### 5.4.6 Zdjęcia stanowiska badawczego

Na fotografiach (rys.2.52 – rys.2.58) widać stanowisko badawcze wraz z wyposażeniem i aparatura pomiarową.



*Rys.2.52 Widok ogólny stanowiska badawczego modelowej sali operacyjnej*



*Rys. 2.53 Statyw z sondami pomiarowymi oraz rejestratory wraz z okablowaniem; na dalszym planie widoczne dwie kratki wywiewne; widoczna również namalowana na podłodze siatka pomiarowa*



*Rys. 2.54 Widok z boku stanowiska badawczego*





Rys. 2.55 Sondy pomiarowe, lampa bezcieniowa oraz instalacja powietrzna



Rys. 2.56 Zbiorniki kanały:  
nawiewny nr 3 oraz wywiewny nr 2,  
a w nich umieszczone czujniki pomiarowe  
QAM 22 (Siemens)



Rys. 2.57 U-rurki do odczytu spadku  
ciśnienia na kryzach pomiarowych



Rys. 2.58 Widok ogólny nawiewnika SLANtinG, lampa bezcieniowa HANAULUX 2005 oraz sondy pomiarowe na wysięgnikach teleskopowych

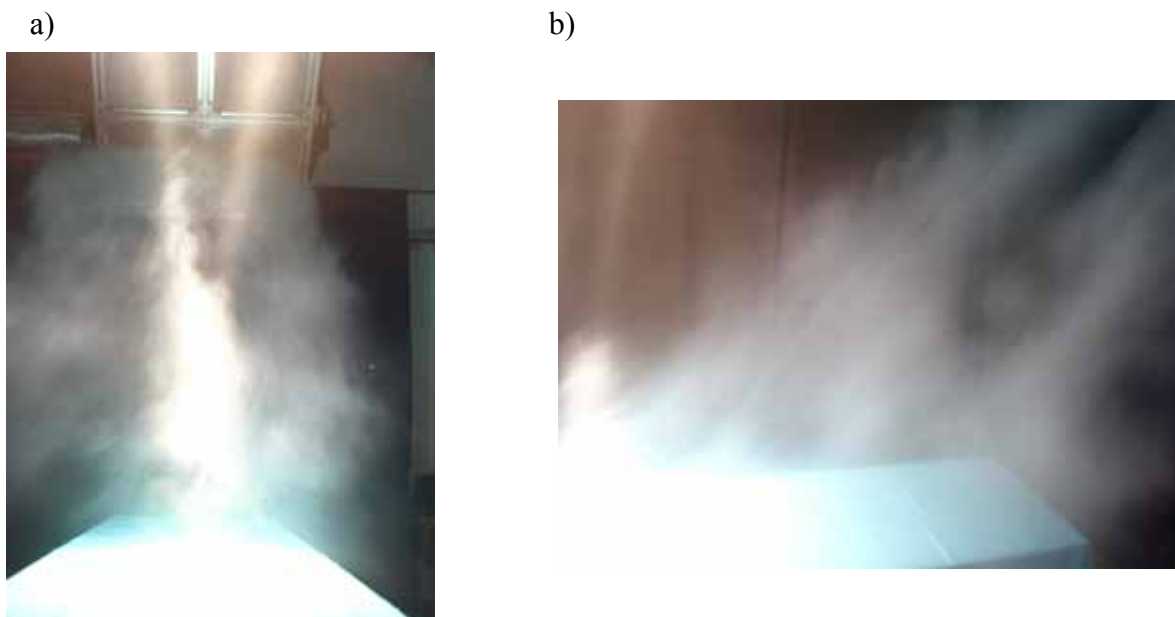
## 5.5 WYNIKI POMIARÓW I ICH ANALIZA

### **5.5.1 Wyniki pomiarów i wstępna ocena**

W związku z tym, iż zdolność chłodząca strumienia powietrza nawiewanego nie była wystarczająca dla powstrzymania ciągłego wzrostu temperatury powietrza w pomieszczeniu (w trakcie przeprowadzanych badań wzrost ten często dochodził nawet do 5<sup>0</sup>C w trakcie jednej sesji pomiarowej dla wybranego wariantu), wiarygodność otrzymanych wyników pomiaru temperatury, stanowi ograniczoną wartość dla prowadzonych analiz. Szczególną uwagę zwrócono na prędkości powietrza. Ze wstępnej analizy wykresów rozkładu pól prędkości oraz zdjęć z zadymiania (rys.2.59a i b) i obserwacji wynika, że powietrze nawiewane w ilości 1400 m<sup>3</sup>/h w mniejszym stopniu miesza się z powietrzem pomieszczenia niż w wariantach: 1600 m<sup>3</sup>/h oraz 1800 m<sup>3</sup>/h. Dlatego też wykresy rozkładów pól prędkości oraz temperatur powietrza dla wszystkich badanych przypadków są do wglądu u autora pracy. Poniżej przedstawiono tylko te najciekawsze, mające największy wpływ na zaproponowane rozwiązanie.

Wyniki badań zestawiono w tabelach pomiarowych. Na rys.2.60 zamieszczono wzór tabeli pomiarowej, która zawiera zarejestrowane temperatury i prędkości powietrza oraz wyliczone średnie arytmetyczne prędkości, temperatury, odchylenia standardowe i średnie błędy. W oparciu o pomiary prędkości sporządzono przebiegi linii strumienia powietrza nawiewanego,

zaznaczone na czerwono. Rozkłady prędkości zilustrowano m.in. za pomocą wykresów warstwowych, wykonanych przy użyciu arkusza kalkulacyjnego programu komputerowego *Microsoft Excel*.



Rys. 2.59 Zadymianie strumienia powietrza nawiewanego dla  $V=1600 \text{ m}^3/\text{h}$ ;  
a) widok z przodu nawiewnika; b) widok z boku nawiewnika

Przytoczono i poddano analizie po jednym z wybranych wariantów dla każdej wersji:  $V=1400 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\alpha=30^\circ$ , stół poz.3, (opis w pkt. 5.5.2.1);  $V=1400 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\alpha=45^\circ$ , stół poz.1, (opis w pkt. 5.5.2.2);  $V=1400 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\alpha=60^\circ$ , stół poz.2, (opis w pkt. 5.5.2.3). Pionowe rozkłady prędkości dotyczą wszystkich trzech płaszczyzn pomiarowych, przechodzących wzdłuż stołu operacyjnego, ciętych odpowiednio wg oznaczeń na dołączonych do wykresów schematach (w górnym prawym rogu na każdym z rysunków). Opis badanych wersji i ich wariantów znajduje się przy wykresach, będących ostatecznymi wynikami badań. Oznaczenia poszczególnych punktów pomiarowych na wykresach odpowiadają przedstawionym na schemacie siatki pomiarowej, zamieszczonej na rys.2.50. W punktach oznaczonych jako 'x' pomiar ze względów technicznych był niemożliwy.

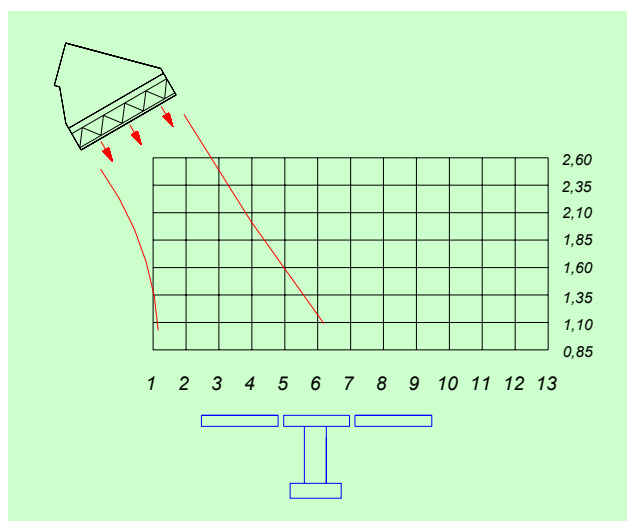
PARAMETRY POMIARU																			
kąt pochyleń α = 30°, strumień powietrza nawiewanego: V=1400(m <sup>3</sup> /h); pozycja stołu nr 2, spadek ciśnienia na kryzie: 24 [mmH <sub>2</sub> O]																			
Pomiar #	Date #	Time	V [m/s]		t [°C]		V [m/s]		t [°C]		V [m/s]		t [°C]		temp. początkowe: tn=22,5 [°C]				
			1.1	2.1	1.2	2.2	3.1	3.2	4.1	4.2	5.1	5.2	6.1	6.2	7.1	7.2	8.1	8.2	
911	2005-05-16	02:32:16	0,15	23,90	0,02	23,96	0,02	24,04	0,05	24,00	0,07	24,09	0,04	23,97	0,10	23,95	0,03	23,95	
912	2005-05-16	02:32:18	0,18	23,90	0,02	23,97	0,03	24,05	0,06	24,01	0,08	24,08	0,04	23,97	0,12	23,95	0,04	23,96	
913	2005-05-16	02:32:20	0,13	23,90	0,03	23,98	0,03	24,08	0,07	24,01	0,04	24,08	0,03	23,97	0,12	23,94	0,07	23,96	
914	2005-05-16	02:32:22	0,10	23,90	0,01	23,99	0,03	24,10	0,06	24,01	0,02	24,08	0,05	23,97	0,14	23,94	0,08	23,95	
915	2005-05-16	02:32:24	0,13	23,90	0,01	23,99	0,02	24,10	0,06	24,01	0,03	24,08	0,07	23,97	0,15	23,93	0,08	23,96	
916	2005-05-16	02:32:26	0,14	23,91	0,01	24,00	0,01	24,11	0,04	24,01	0,04	24,08	0,09	23,96	0,14	23,93	0,09	23,96	
917	2005-05-16	02:32:28	0,19	23,91	0,01	24,00	0,01	24,11	0,03	24,00	0,05	24,08	0,09	23,96	0,14	23,93	0,12	23,95	
918	2005-05-16	02:32:30	0,21	23,92	0,02	24,02	0,01	24,11	0,03	24,01	0,05	24,07	0,10	23,96	0,13	23,92	0,12	23,94	
919	2005-05-16	02:32:32	0,18	23,92	0,03	24,02	0,00	24,11	0,02	24,01	0,04	24,07	0,06	23,96	0,13	23,92	0,13	23,94	
920	2005-05-16	02:32:34	0,16	23,92	0,03	24,02	0,00	24,11	0,01	24,01	0,02	24,07	0,07	23,96	0,12	23,92	0,13	23,93	
S1_6	średnia arytmetyczna:		0,16	23,91	0,02	24,00	0,02	24,09	0,04	24,01	0,04	24,08	0,06	23,97	0,13	23,93	0,09	23,95	
	odchylenie średnie:		0,03	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01
	odchylenie standard.:		0,03	0,01	0,01	0,02	0,01	0,03	0,02	0,00	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04	0,01
	błąd średni:		0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
921	2005-05-16	02:33:13	0,34	23,99	0,12	24,12	0,01	24,22	0,06	24,03	0,10	24,17	0,10	23,97	0,11	23,90	0,11	23,86	
922	2005-05-16	02:33:15	0,38	23,99	0,11	24,13	0,01	24,22	0,08	24,03	0,09	24,18	0,07	23,98	0,11	23,90	0,11	23,86	
923	2005-05-16	02:33:17	0,38	24,00	0,11	24,14	0,02	24,22	0,08	24,04	0,06	24,18	0,06	23,98	0,09	23,90	0,11	23,85	
924	2005-05-16	02:33:19	0,32	24,00	0,09	24,14	0,04	24,22	0,06	24,04	0,04	24,18	0,05	23,98	0,08	23,90	0,12	23,85	
925	2005-05-16	02:33:21	0,28	24,00	0,10	24,14	0,06	24,23	0,06	24,04	0,02	24,19	0,04	23,99	0,07	23,91	0,12	23,85	
926	2005-05-16	02:33:23	0,28	23,99	0,12	24,15	0,07	24,23	0,03	24,04	0,01	24,20	0,04	24,00	0,07	23,91	0,11	23,85	
927	2005-05-16	02:33:25	0,23	23,99	0,15	24,15	0,07	24,23	0,02	24,05	0,01	24,21	0,05	24,00	0,08	23,92	0,10	23,85	
928	2005-05-16	02:33:27	0,33	24,00	0,12	24,15	0,07	24,22	0,01	24,05	0,03	24,22	0,06	24,00	0,10	23,92	0,11	23,85	
929	2005-05-16	02:33:29	0,31	24,00	0,09	24,16	0,07	24,22	0,02	24,06	0,04	24,22	0,07	24,01	0,11	23,92	0,11	23,85	
930	2005-05-16	02:33:31	0,33	24,00	0,11	24,17	0,06	24,22	0,03	24,06	0,03	24,22	0,06	24,00	0,09	23,92	0,10	23,85	
S1_7	średnia arytmetyczna:		0,32	24,00	0,11	24,15	0,05	24,22	0,05	24,04	0,04	24,20	0,06	23,99	0,09	23,91	0,11	23,85	
	odchylenie średnie:		0,034	0,005	0,012	0,011	0,022	0,004	0,023	0,009	0,024	0,017	0,012	0,011	0,013	0,008	0,004	0,003	
	odchylenie standard.:		0,046	0,005	0,018	0,014	0,026	0,005	0,026	0,011	0,031	0,019	0,018	0,013	0,016	0,009	0,007	0,004	
	błąd średni:		0,015	0,002	0,006	0,005	0,008	0,002	0,008	0,003	0,010	0,006	0,006	0,004	0,005	0,003	0,002	0,001	
931	2005-05-16	02:34:06	0,39	24,10	0,18	24,18	0,04	24,14	0,05	24,01	0,05	24,14	0,06	23,99	0,11	23,93	0,09	23,84	
932	2005-05-16	02:34:08	0,46	24,10	0,24	24,18	0,05	24,14	0,05	24,01	0,08	24,13	0,07	23,99	0,11	23,93	0,09	23,84	
933	2005-05-16	02:34:10	0,47	24,11	0,22	24,18	0,08	24,13	0,06	24,00	0,05	24,13	0,10	23,98	0,11	23,92	0,07	23,84	
934	2005-05-16	02:34:12	0,39	24,11	0,19	24,17	0,09	24,13	0,07	24,00	0,06	24,12	0,14	23,97	0,12	23,91	0,07	23,84	
935	2005-05-16	02:34:14	0,40	24,11	0,15	24,17	0,11	24,12	0,06	24,00	0,04	24,11	0,13	23,96	0,12	23,91	0,06	23,84	
936	2005-05-16	02:34:16	0,45	24,11	0,14	24,18	0,11	24,12	0,04	24,00	0,06	24,11	0,09	23,96	0,11	23,91	0,08	23,84	
937	2005-05-16	02:34:18	0,51	24,13	0,15	24,19	0,10	24,13	0,03	23,99	0,05	24,10	0,11	23,96	0,10	23,91	0,07	23,84	
938	2005-05-16	02:34:20	0,51	24,14	0,16	24,20	0,07	24,15	0,02	23,99	0,06	24,09	0,13	23,95	0,12	23,90	0,07	23,84	
939	2005-05-16	02:34:22	0,55	24,14	0,15	24,21	0,06	24,18	0,02	23,99	0,07	24,09	0,14	23,94	0,13	23,89	0,05	23,84	
940	2005-05-16	02:34:24	0,55	24,16	0,13	24,22	0,05	24,19	0,03	23,99	0,10	24,08	0,13	23,93	0,15	23,89	0,07	23,84	
S1_8	średnia arytmetyczna:		0,47	24,12	0,17	24,19	0,08	24,14	0,04	24,00	0,06	24,11	0,11	23,96	0,12	23,91	0,07	23,84	
	odchylenie średnie:		0,050	0,017	0,029	0,014	0,022	0,018	0,015	0,006	0,013	0,016	0,024	0,016	0,010	0,010	0,009	0,000	
	odchylenie standard.:		0,062	0,020	0,036	0,017	0,026	0,024	0,018	0,008	0,018	0,020	0,029	0,020	0,014	0,014	0,012	0,000	
	błąd średni:		0,019	0,006	0,011	0,005	0,008	0,008	0,006	0,002	0,006	0,006	0,009	0,006	0,004	0,004	0,004	0,000	
941	2005-05-16	02:35:06	0,43	24,18	0,09	24,23	0,03	24,13	0,01	23,95	0,02	24,02	0,04	23,89	0,05	23,87	0,08	23,82	
942	2005-05-16	02:35:08	0,48	24,18	0,05	24,22	0,04	24,14	0,00	23,95	0,03	24,03	0,04	23,89	0,05	23,88	0,09	23,82	
943	2005-05-16	02:35:10	0,50	24,19	0,10	24,22	0,05	24,15	0,01	23,96	0,04	24,04	0,04	23,89	0,06	23,88	0,08	23,82	
944	2005-05-16	02:35:12	0,53	24,21	0,13	24,22	0,04	24,16	0,02	23,97	0,04	24,05	0,07	23,89	0,06	23,88	0,08	23,81	
945	2005-05-16	02:35:14	0,53	24,21	0,15	24,22	0,04	24,17	0,03	23,99	0,03	24,06	0,10	23,89	0,10	23,88	0,08	23,81	
946	2005-05-16	02:35:16	0,52	24,21	0,16	24,21	0,06	24,20	0,03	24,02	0,03	24,06	0,11	23,89	0,11	23,88	0,07	23,81	
947	2005-05-16	02:35:18	0,49	24,21	0,16	24,21	0,07	24,23	0,03	24,05	0,03	24,06	0,10	23,88	0,10	23,88	0,05	23,82	
948	2005-05-16	02:35:20	0,50	24,21	0,13	24,21	0,08	24,26	0,03	24,08	0,03	24,07	0,10	23,88	0,09	23,88	0,06	23,82	
949	2005-05-16	02:35:22	0,53	24,22	0,13	24,22	0,09	24,29	0,04	24,11	0,03	24,07	0,08	23,88	0,07	23,88	0,05	23,82	
950	2005-05-16	02:35:24	0,54	24,23	0,12	24,23	0,08	24,32	0,03	24,12	0,03	24,07	0,06	23,88	0,07	23,89	0,07	23,82	
S1_9	średnia arytmetyczna:		0,51	24,20	0,12	24,22	0,06	24,21	0,02	24,02	0,03	24,05	0,07	23,89	0,08	23,88	0,07	23,82	
	odchylenie średnie:		0,025	0,013	0,026	0,005	0,018	0,056	0,010	0,056	0,004	0,014	0,024	0,005	0,018	0,002	0,012	0,004	
	odchylenie standard.:		0,033	0,016	0,034	0,007	0,021	0,067	0,013	0,066	0,006	0,018	0,028	0,005	0,021	0,005	0,015	0,005	
	błąd średni:		0,010	0,005	0,011	0,002	0,007	0,021	0,004	0,021	0,002	0,006	0,009	0,002	0,004	0,001	0,005	0,002	
951	2005-05-16	02:36:09	0,37	24,16	0,16	24,30	0,12	24,50	0,08	24,24	0,08	24,19	0,04	23,92	0,07	23,91	0,06	23,79	
952	2005-05-16	02:36:11	0,35	24,16	0,13	24,30	0,10	24,52	0,10	24,27	0,07	24,19	0,05	23,93	0,04	23,91	0,05	23,80	
953	2005-05-16	02:36:12	0,36	24,15	0,15	24,30	0,10	24,54	0,09	24,29	0,05	24,19	0,04	23,93	0,04	23,92	0,05	23,80	
954	2005-05-16	02:36:14	0,33	24,15	0,15	24,29	0,10	24,57	0,08	24,30	0,03	24,20	0,05	23,93	0,04	23,92	0,06	23,80	
955	2005-05-16	02:36:16	0,33	24,14	0,17	24,29	0,10	24,57	0,05	24,30	0,03	24,22	0,05	23,93	0,05	23,92	0,07	23,80	
956	2005-05-16	02:36:18	0,35	24,14	0,20	24,28	0,09	24,58	0,04	24,30	0,03	24,23	0,08	23,93	0,06	23,92	0,10	23,80	
957	2005-05-16	02:36:20	0,37	24,14	0,16	24,28	0,08	24,57	0,02	24,30									

## 5.5.2 Analiza sporządzonych wykresów

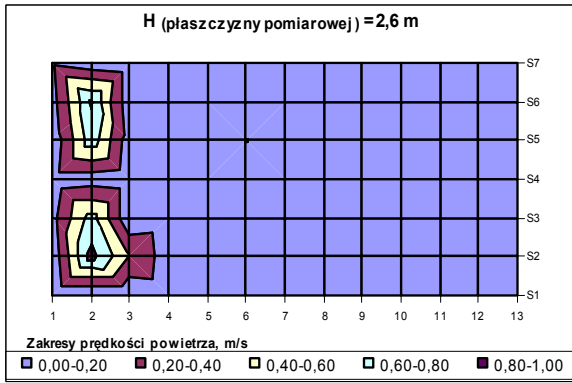
Na wykresach w *rys.2.62 - 2.69*, *rys.2.75 - 2.82*, *rys.2.88 - 2.95*, przedstawiono przemieszczanie się strugi powietrza nawiewanego w ośmiu ciętych poziomo płaszczyznach pomiarowych. Czerwony obrys na dwóch ostatnich wykresach (*rys.2.68 - 2.69*, *rys.2.81 - 2.82*, *rys.2.74 - 2.75*) w każdej z opisanych wersji, oznacza pole zajmowane przez stół operacyjny, a więc najbardziej interesujący nas obszar krytyczny. Każdy z wykresów odpowiada pełnej poziomej płaszczyźnie pomiarowej dla określonej wysokości.

### 5.5.2.1 Wersja nr 1 i jeden z wybranych wariantów: $V=1400\text{ m}^3/\text{h}$ , $\alpha=30^\circ$ , stół poz.3

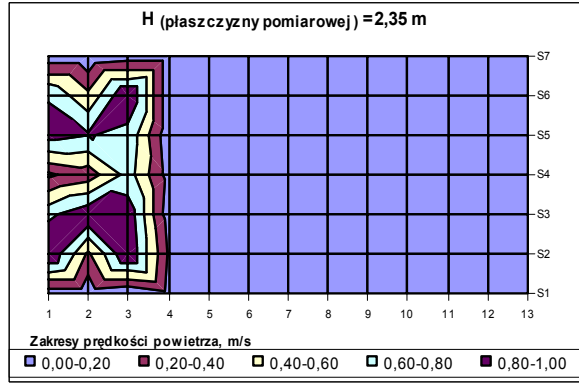
Struga powietrza wypływa z opisanego w pkt.5.3 nawiewnika skośnego, zawieszzonego pod kątem  $\alpha=30^\circ$  do płaszczyzny stołu operacyjnego; umieszczonego w poz.3 (*rys.2.49* – kolor różowy); strumień powietrza nawiewanego  $V=1400\text{ m}^3/\text{h}$  (*rys.2.61*).



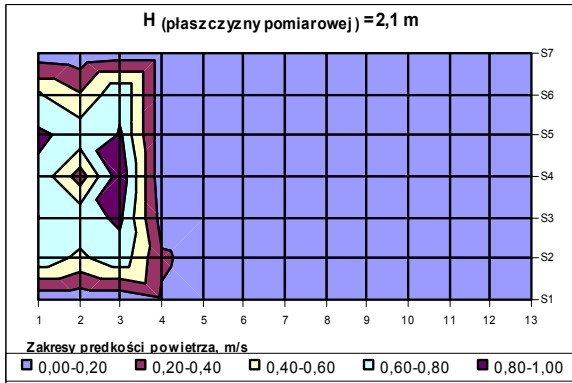
*Rys. 2.61 Nawiewnik pochylony pod kątem  $\alpha=30^\circ$  do płaszczyzny stołu operacyjnego zajmującego poz.3 wraz z naniesioną siatką pomiarową – widok z boku*



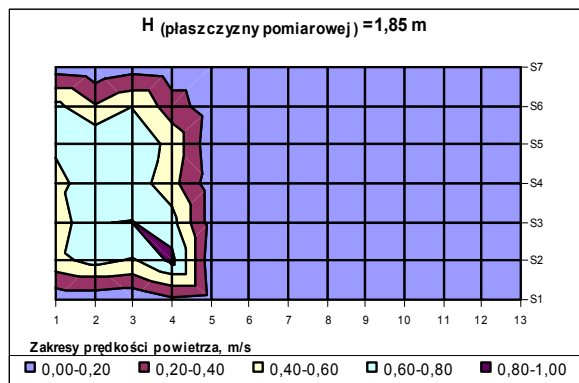
Rys. 2.62 Rozkład pól prędkości powietrza w obszarze działania nawiewnika dla poziomej płaszczyzny pomiarowej ciętej na wysokości  $H=2,60m$ ;



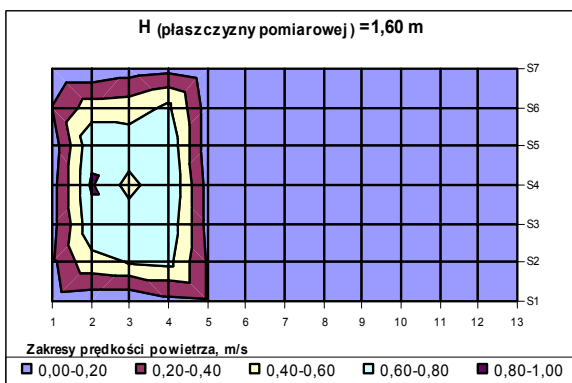
Rys. 2.63 Rozkład pól prędkości powietrza w obszarze działania nawiewnika dla poziomej płaszczyzny pomiarowej ciętej na wysokości  $H=2,35m$ ;



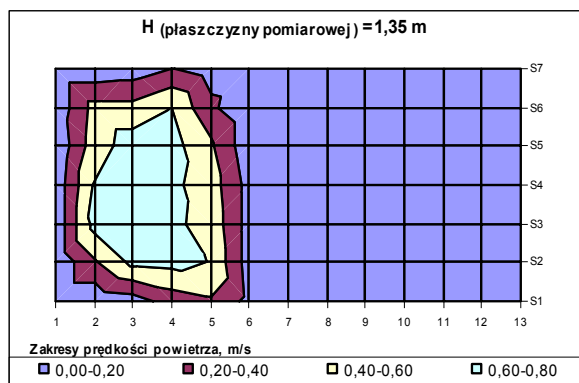
Rys. 2.64 Rozkład pól prędkości powietrza w obszarze działania nawiewnika dla poziomej płaszczyzny pomiarowej ciętej na wysokości  $H=2,10m$ ;



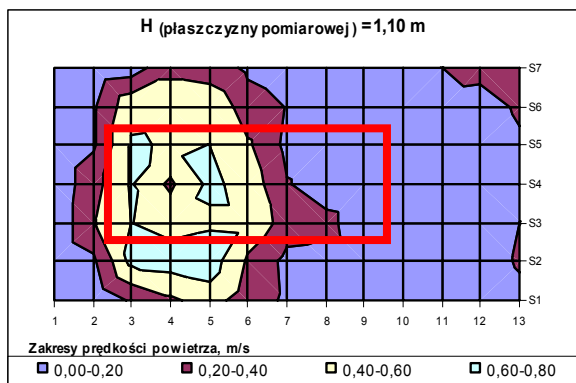
Rys. 2.65 Rozkład pól prędkości powietrza w obszarze działania nawiewnika dla poziomej płaszczyzny pomiarowej ciętej na wysokości  $H=1,85m$ ;



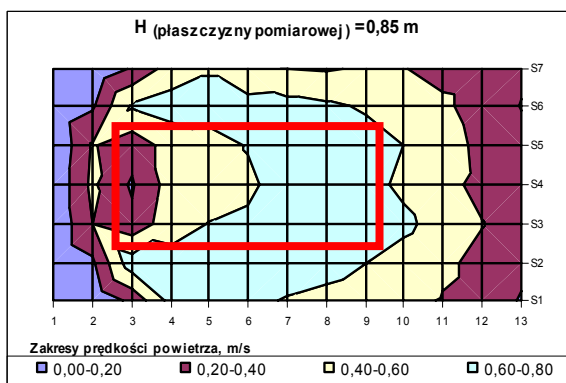
Rys. 2.66 Rozkład pól prędkości powietrza w obszarze działania nawiewnika dla poziomej płaszczyzny pomiarowej ciętej na wysokości  $H=1,60m$ ;



Rys. 2.67 Rozkład pól prędkości powietrza w obszarze działania nawiewnika dla poziomej płaszczyzny pomiarowej ciętej na wysokości  $H=1,35m$ ;



Rys. 2.68 Rozkład pól prędkości powietrza w obszarze działania nawiewnika dla poziomej płaszczyzny pomiarowej ciętej na wysokości  $H=1,10\text{m}$ ;

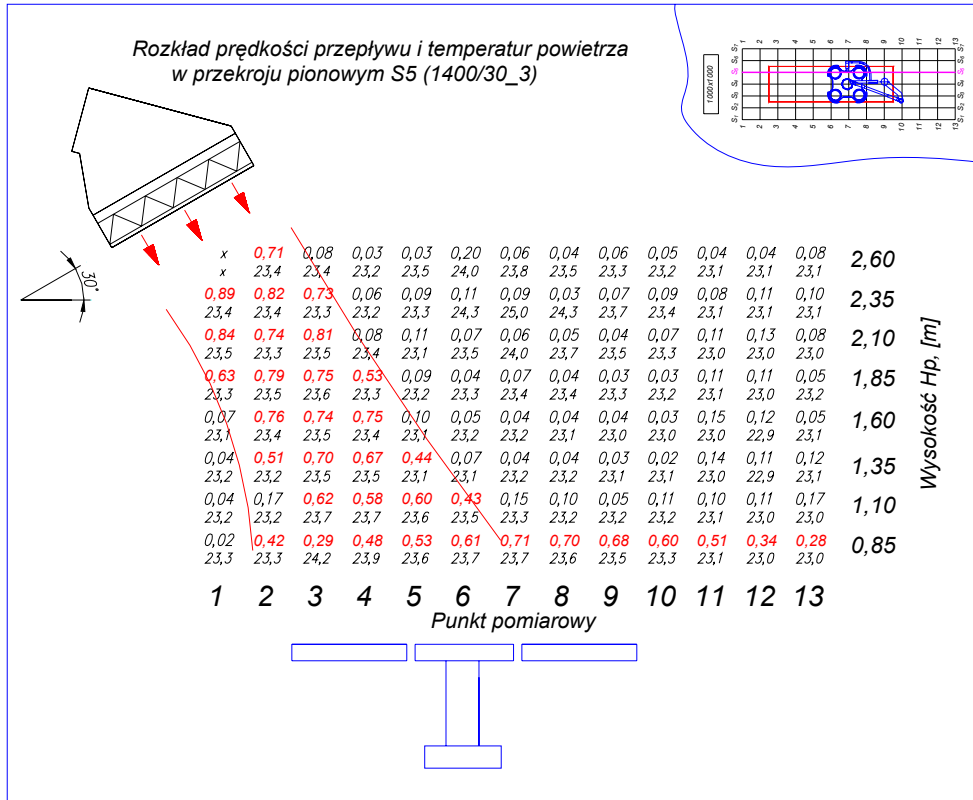


Rys. 2.69 Rozkład pól prędkości powietrza w obszarze działania nawiewnika dla poziomej płaszczyzny pomiarowej ciętej na wysokości  $H=0,85\text{m}$ ;

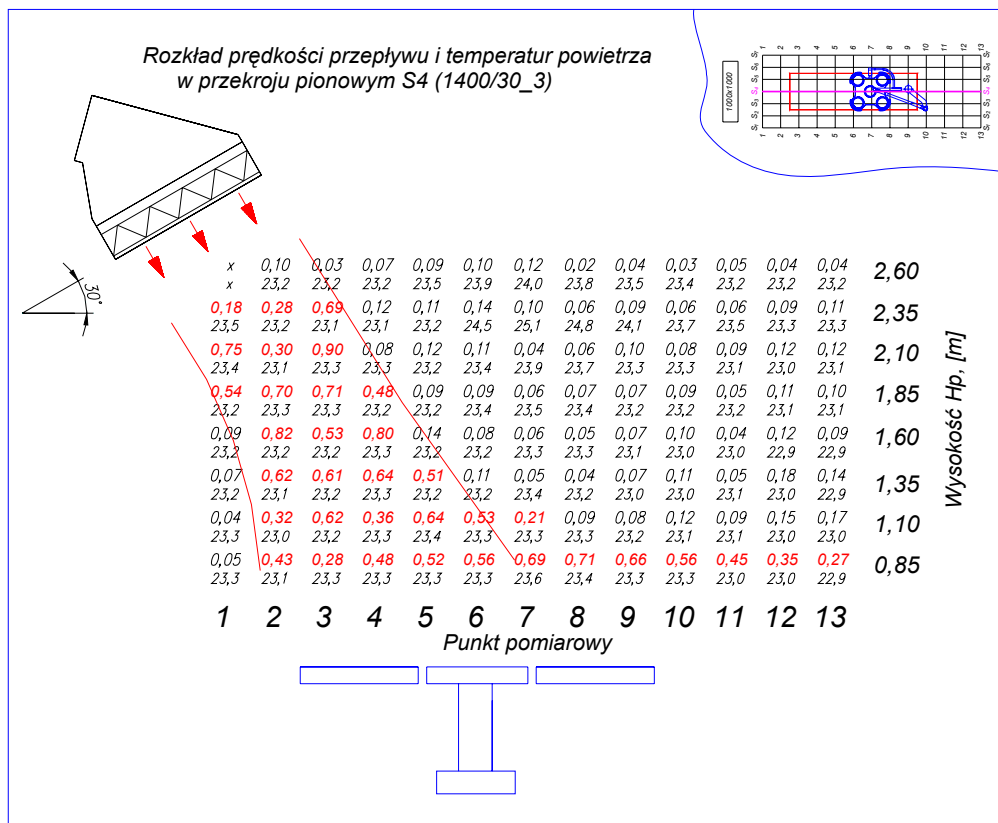
Na pierwszych trzech rysunkach (rys. 2.62, rys. 2.63, rys. 2.64), zauważyć można proces kształtowania się właściwej strugi nawiewnej, wynikający z umiejscowienia czterech filtrów w skrzyni nawiewnika. W początkowej fazie wypływu powietrza z nawiewnika wyraźnie widoczne są dwie strugi cząstkowe (rys. 2.62), które w pewnej odległości łączą się ze sobą. Zwartą strugę zauważyć możemy dopiero na rys. 2.65. Strefę tę do wysokości 2,10 m potraktować należy jako przejściową dla kształtowania się strumienia powietrza nawiewanego. Następnie struga ta kieruje się w stronę obszaru zajmowanego przez stół operacyjny. Na rys. 2.68, w obszarze krytycznym zarysowuje się dość stabilny rozkład prędkości. Osiągane prędkości na wysokości operowanego pacjenta (w warunkach rzeczywistych,  $h=1,10\text{m}$ ) zawierają się najczęściej w przedziale 0,40 – 0,60 m/s (rys. 2.68). Jednakże struga powietrza uderza w przednią część stołu operacyjnego (od strony nóg pacjenta), a następnie ześlizguje się w kierunku jego tylnej części. Na rys. 2.69 wyraźnie widoczny jest spadek prędkości w środkowej części stołu, powodowany siłami tarcia, co powoduje znaczne rozbitcie samej strugi. Efekt ześlizgiwania się z dowolnej powierzchni jest niepożądany, gdyż wiąże się z porywaniem cząstek zanieczyszczeń z omywanych powierzchni. Dochodzi więc wtedy zawsze do skażenia początkowo sterylnej strumienia powietrza nawiewanego.

Z rozkładów prędkości w przekrojach pionowych (rys. 2.70, rys. 2.71, rys. 2.72) oraz fotografii przedstawiającej zadymiony strumień powietrza nawiewanego (rys. 2.73), można dokładnie wskazać przebieg strugi nawiewnej (zaznaczono na czerwono). Wypływające powietrze omywa co prawda stół operacyjny (a zwłaszcza część przednią od strony nóg pacjenta), jednak jeszcze pod zbyt dużym kątem kieruje się ku dołowi.

Stopniowy zanik prędkości na drodze przebiegu ruchu powietrza wskazywać może na małą indukcję powietrza z pomieszczenia.

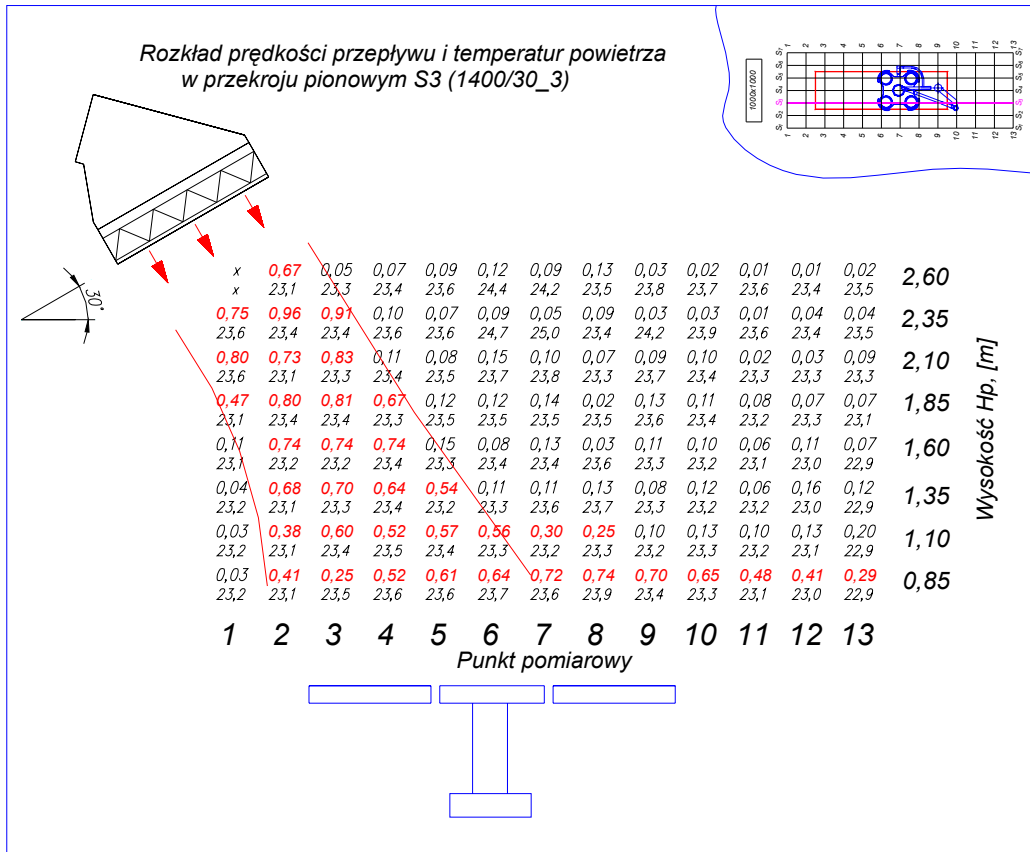


Rys.2.70 Rozkład prędkości przepływu powietrza w obszarze działania nawiewnika w pionowej płaszczyźnie pomiarowej, przebiegającej wzdłuż osi wyznaczonej przez punkty S5-S5



Rys.2.71 Rozkład prędkości przepływu powietrza w obszarze działania nawiewnika w pionowej płaszczyźnie pomiarowej, przebiegającej wzdłuż osi wyznaczonej przez punkty S4-S4





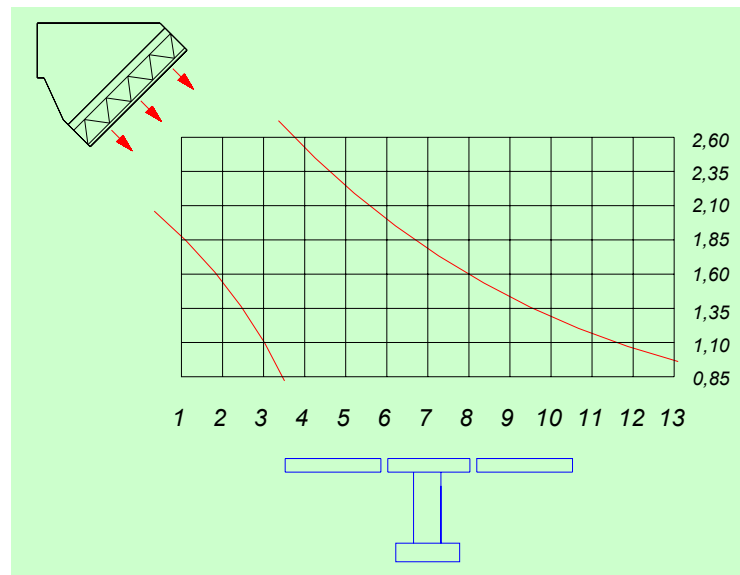
Rys.2.72 Rozkład prędkości przepływu powietrza w obszarze działania nawiewnika w pionowej płaszczyźnie pomiarowej, przebiegającej wzdłuż osi wyznaczonej przez punkty S3-S3



Rys.2.73 Widok z boku strugi nawiewnej uderzającej w przednią część stołu operacyjnego – wizualizacja poprzez zadymianie;  $V=1400 \text{ m}^3/\text{h}$ , kąt pochylecia nawiewnika  $30^\circ$ , stół poz. 3

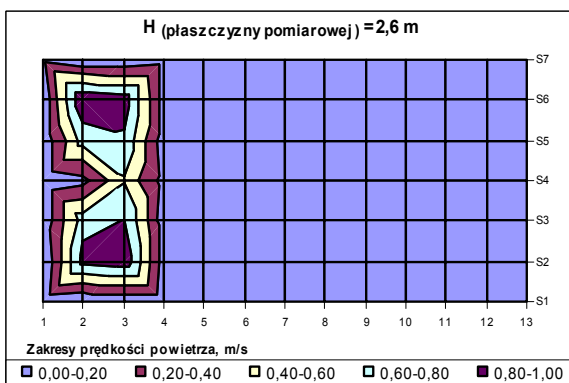
### 5.5.2.2 Wersja nr 2 i jeden z wybranych wariantów: $V=1400 \text{ m}^3/\text{h}$ , $\alpha=45^\circ$ , stół poz.1

Struga powietrza nawiewanego wypływa z opisanego w rozdz.5.3 nawiewnika skośnego, zawieszzonego pod kątem  $\alpha=45^\circ$  do płaszczyzny stołu operacyjnego; umieszczonego na poz.1 (rys.2.49 – kolor czarny); strumień powietrza nawiewanego  $V=1400 \text{ m}^3/\text{h}$ .

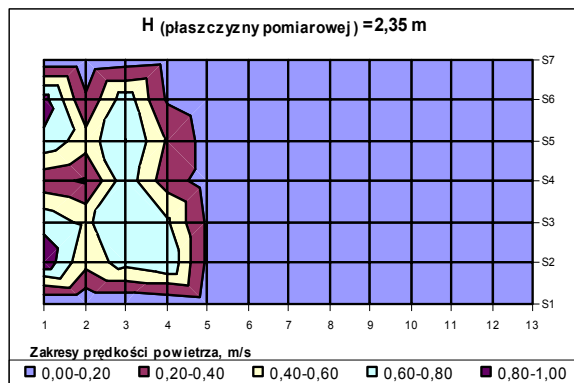


Rys.2.74 Nawiewnik pochyłony pod kątem  $\alpha=45^\circ$  do płaszczyzny stołu operacyjnego zajmującego poz.1 wraz z naniesioną siatką pomiarową – widok z boku

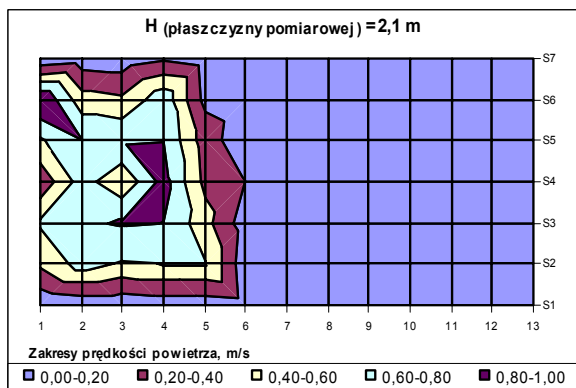
Podobnie jak w uprzednio omawianej wersji (pkt.5.5.2.1), na pierwszych trzech rysunkach (rys.2.75, rys.2.76, rys.2.77), zauważalny jest proces kształtowania się właściwej strugi nawiewnej.



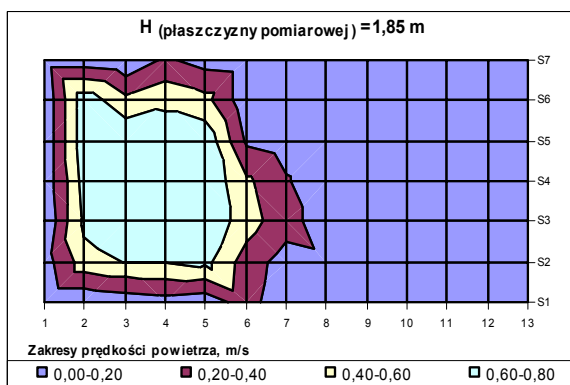
Rys.2.75 Rozkład pól prędkości powietrza w obszarze działania nawiewnika dla poziomej płaszczyzny pomiarowej ciętej na wysokości  $H=2,60\text{m}$ ;



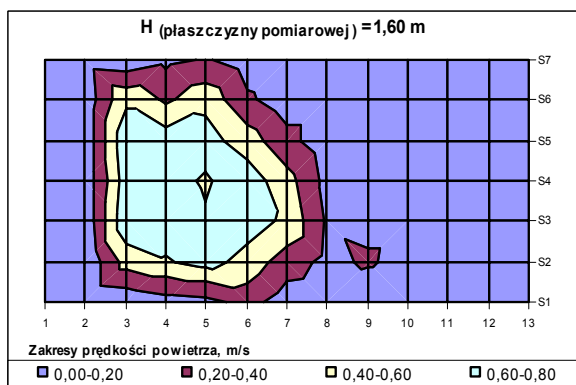
Rys.2.76 Rozkład pól prędkości powietrza w obszarze działania nawiewnika dla poziomej płaszczyzny pomiarowej ciętej na wysokości  $H=2,35\text{m}$ ;



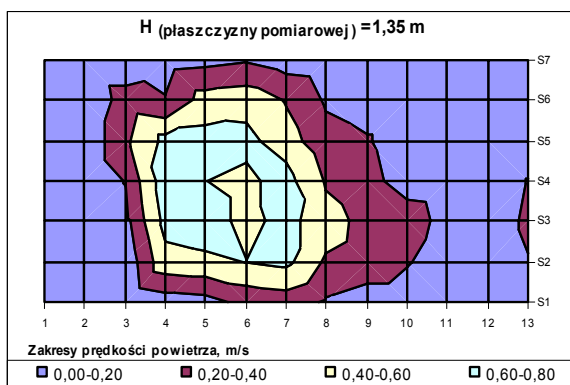
Rys.2.77 Rozkład pól prędkości powietrza w obszarze działania nawiewnika dla poziomej płaszczyzny pomiarowej ciętej na wysokości  $H=2,10\text{m}$ ;



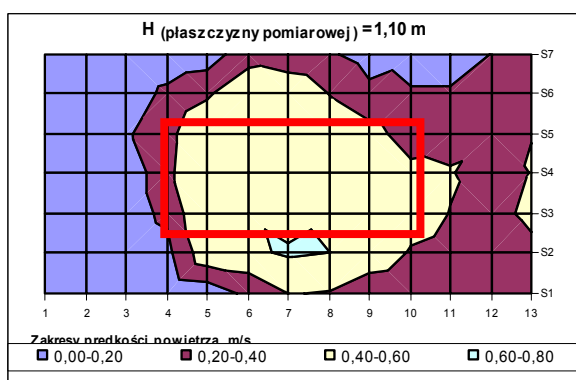
Rys.2.78 Rozkład pól prędkości powietrza w obszarze działania nawiewnika dla poziomej płaszczyzny pomiarowej ciętej na wysokości  $H=1,85\text{m}$ ;



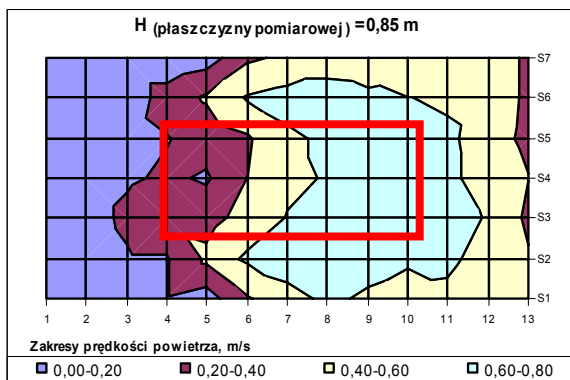
Rys.2.79 Rozkład pól prędkości powietrza w obszarze działania nawiewnika dla poziomej płaszczyzny pomiarowej ciętej na wysokości  $H=1,60\text{m}$ ;



Rys.2.80 Rozkład pól prędkości powietrza w obszarze działania nawiewnika dla poziomej płaszczyzny pomiarowej ciętej na wysokości  $H=1,35\text{m}$ ;



Rys.2.81 Rozkład pól prędkości powietrza w obszarze działania nawiewnika dla poziomej płaszczyzny pomiarowej ciętej na wysokości  $H=1,10\text{m}$ ;



Rys.2.82 Rozkład pól prędkości powietrza w obszarze działania nawiewnika dla poziomej płaszczyzny pomiarowej ciętej na wysokości  $H=0,85\text{m}$ ;

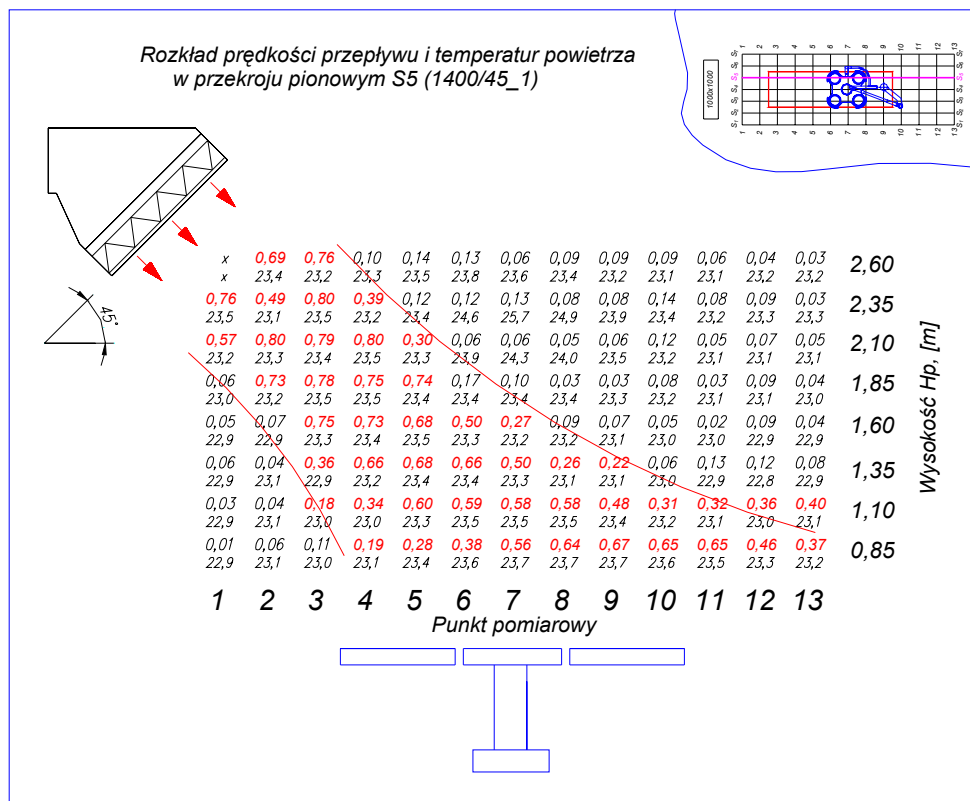
W początkowej fazie wypływu powietrza z nawiewnika wyraźnie widoczne są dwie (rys.2.75), a później nawet cztery strugi cząstkowe (rys.2.76), które w pewnej odległości łączą się ze sobą, w zwartą strugę (rys.2.78). Takie kształtowanie strugi nawiewnej wynika z umiejscowienia czterech filtrów w skrzyni nawiewnika. Przejściowa strefa dla kształtowania się strugi powietrza nawiewanego kończy się również na wysokości 2,10 m. Już na rys.2.78, dostrzegalne jest jednolite pole prędkości. Prędkości powietrza w jądrze strumienia nawiewanego są jeszcze zbyt wysokie, aby wprowadzić to powietrze do strefy ochronnej sali operacyjnej (prędkości zawierają się w przedziale 0,60 – 0,80 m/s; *zaznaczono kolorem niebieskim na wykresach warstwowych*). Następnie struga ta kieruje się pionowo w dół, pod kątem  $45^{\circ}$  do płaszczyzny stołu operacyjnego jako zwarta, albowiem nie spotyka na swojej drodze żadnych przeszkód (rys.2.78, 2.79, 2.80, 2.81). W ten sposób, jak podają Porowski, Szczechowiak, wydaje się być spełniony pierwszy z zasadniczych celów wentylacji, tzn. ‘doprowadzone powietrze czyste (zawierające odpowiednią ilość powietrza świeżego) powinno zostać możliwie w całości doprowadzone do strefy roboczej pomieszczenia, tzn. nie powinno dochodzić do przepływu obejściowego poza tą strefą – maksymalna czystość w strefie roboczej’[30].

W badanym wariancie uzyskano zadawalające wyniki, w najbardziej pożądanym obszarze krytycznym (czerwony prostokąt). Struga powietrza sterylnego trafia w miejsce, które w rzeczywistości przeznaczone jest dla operowanego pacjenta, a stół operacyjny jest nią objęty prawie w całości (rys.2.81). Uzyskano również pożądaną rozkład prędkości na wysokości  $h=1,10\text{m}$ ,  $w = 0,40 - 0,60\text{ m/s}$  (żółte pole w rys.2.81).

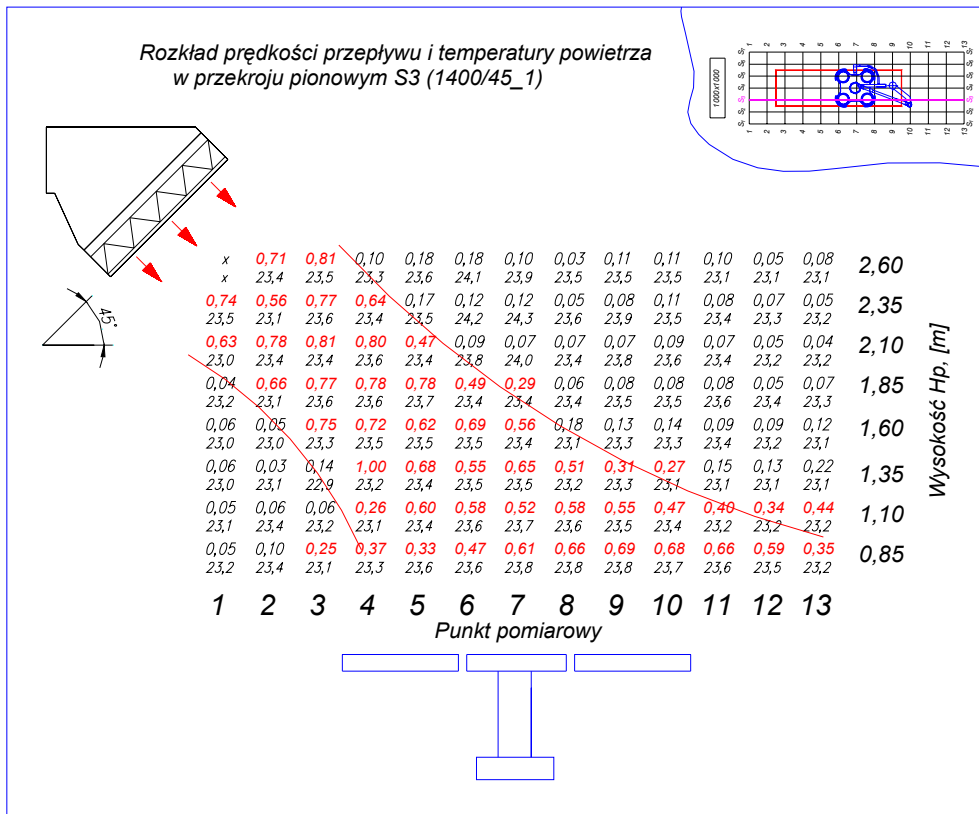
Z rozkładów prędkości w przekrojach pionowych (rys.2.83, 2.84, 2.85) oraz fotografii przedstawiającej zadymiony strumień powietrza nawiewanego (rys.2.86), widać dokładnie przebieg ruchu strugi nawiewnej (zaznaczono na czerwono). Obrys wypływającego strumienia powietrza, widoczny na fotografii (2.86) dowodzi, iż obszar stołu operacyjnego jest całkowicie omywany sterylnym powietrzem nawiewanym, które na swej drodze nie spotkało aż do tego momentu żadnych przeszkód. Powyższe oraz stopniowy zanik prędkości w nawiewanym strumieniu, wskazuje na korzystną małą indukcję powietrza z pomieszczenia; co dowodzi zachowaniu sterylności strumienia powietrza nawiewanego.

Rozkład prędkości prezentowany na rys.2.82 nie jest już tak zadawalający jak poprzednio (rys.2.81), i jest konsekwencją odbicia strugi nawiewnej po jej uprzednim ‘uderzeniu’ w stół operacyjny. Zachodzą podobne zjawiska, jak opisane w pkt. 5.5.2.1. Zjawiska, które w rzeczywistości zachodzą będą poniżej operowanej rany, są w aspekcie higienicznym mało istotne. A dalsze przebiegi ruchu powietrza służyć mają jedynie jego

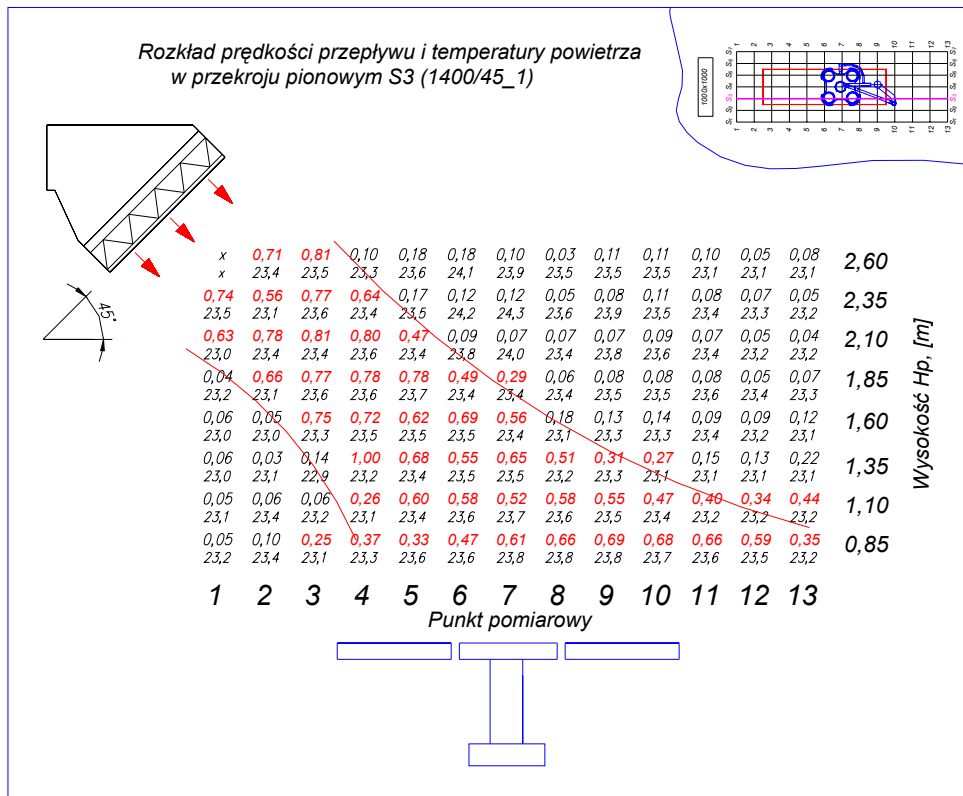
odprowadzeniu, najkrótszą drogą do elementów usuwających powietrze z pomieszczenia (kratki wywiewne usytuowane w dolnej części pomieszczenia po przeciwległej części sali względem nawiewnika). Dowodzi to spełnieniu drugiego zasadniczego celu skutecznego przepływu powietrza, tj. warunku ‘hermetyzacji źródeł zanieczyszczeń’ [30]. ‘Ze względu na usytuowanie źródeł emisji substancji szkodliwych w pomieszczeniu powietrze czyste należy doprowadzić w taki sposób aby zanieczyszczenia trafiały jak najszybciej do strumienia powietrza wywiewanego i możliwie jak najmniej kontaktowały się ze strefą roboczą’ [30].



Rys.2.83 Rozkład prędkości przepływu powietrza w obszarze działania nawiewnika w pionowej płaszczyźnie pomiarowej, przebiegającej wzdłuż osi wyznaczonej przez punkty S5-S5



Rys.2.84 Rozkład prędkości przepływu powietrza w obszarze działania nawiewnika w pionowej płaszczyźnie pomiarowej, przebiegającej wzdłuż osi wyznaczonej przez punkty S3-S3



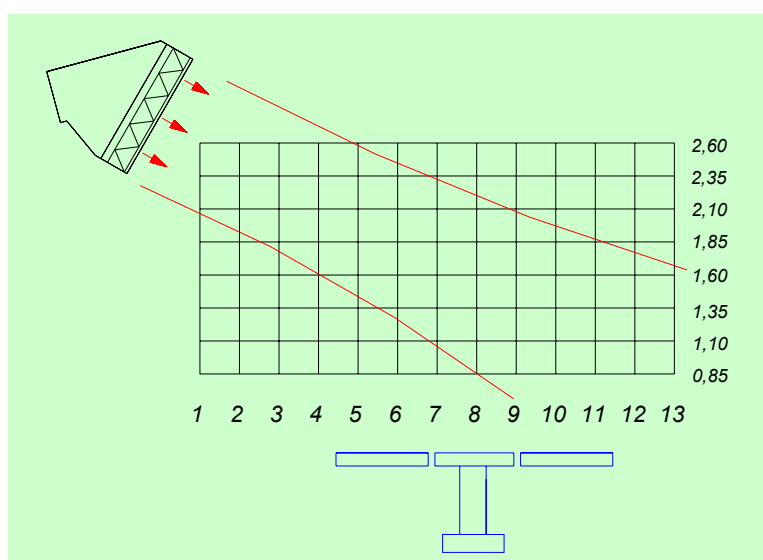
Rys.2.85 Rozkład prędkości przepływu powietrza w obszarze działania nawiewnika w pionowej płaszczyźnie pomiarowej, przebiegającej wzdłuż osi wyznaczonej przez punkty S4-S4



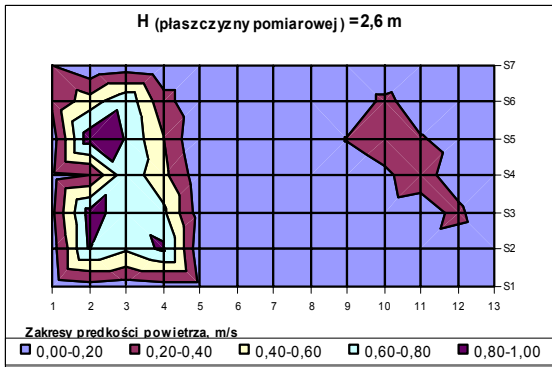
Rys.2.86 Widok z boku strugi nawiewnej uderzającej w pożądaný obszar krytyczny – wizualizacja poprzez zadymianie;  $V=1400 \text{ m}^3/\text{h}$ , kąt pochylenia nawiewnika  $45^\circ$ , stół poz. 1

### 5.5.2.3 Wersja nr 3 i jeden z wybranych wariantów: $V=1400 \text{ m}^3/\text{h}$ , $\alpha=60^\circ$ , stół poz.2

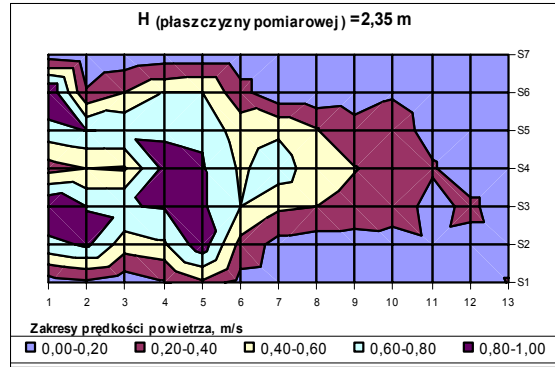
Struga powietrza nawiewanego wypływa z (opisanego w rozdz.5.3) nawiewnika skośnego, zawieszzonego pod kątem  $\alpha=60^\circ$  do płaszczyzny stołu operacyjnego; umieszczonego na poz.2 (rys.2.49); strumień powietrza nawiewanego  $V=1400 \text{ m}^3/\text{h}$ .



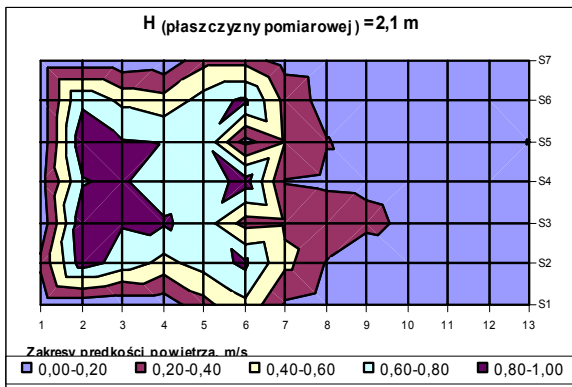
Rys. 2.74 Nawiewnik pochylony pod kątem  $\alpha=60^\circ$  do płaszczyzny stołu operacyjnego w poz.2 wraz z naniesioną siatką pomiarową – widok z boku



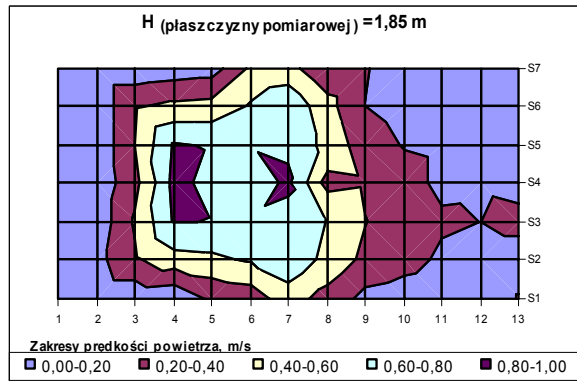
Rys. 2.88 Rozkład pól prędkości powietrza w obszarze działania nawiewnika dla poziomej płaszczyzny pomiarowej ciętej na wysokości  $H=2,60m$ ;



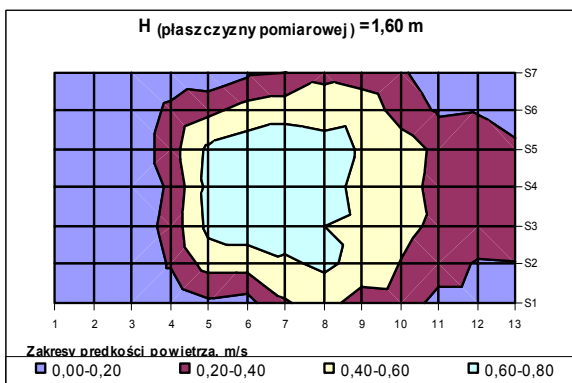
Rys. 2.89 Rozkład pól prędkości powietrza w obszarze działania nawiewnika dla poziomej płaszczyzny pomiarowej ciętej na wysokości  $H=2,35m$ ;



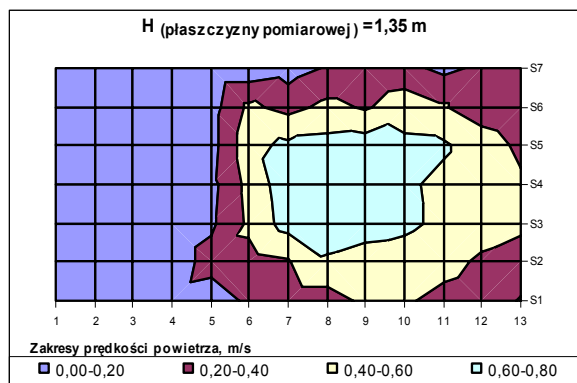
Rys. 2.90 Rozkład pól prędkości powietrza w obszarze działania nawiewnika dla poziomej płaszczyzny pomiarowej ciętej na wysokości  $H=2,10m$ ;



Rys. 2.91 Rozkład pól prędkości powietrza w obszarze działania nawiewnika dla poziomej płaszczyzny pomiarowej ciętej na wysokości  $H=1,85m$ ;

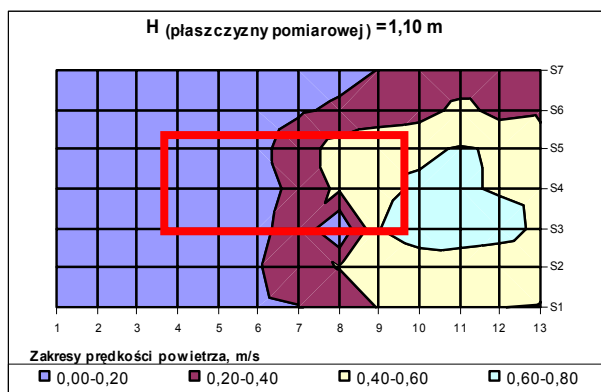


Rys. 2.92 Rozkład pól prędkości powietrza w obszarze działania nawiewnika dla poziomej płaszczyzny pomiarowej ciętej na wysokości  $H=1,60m$ ;

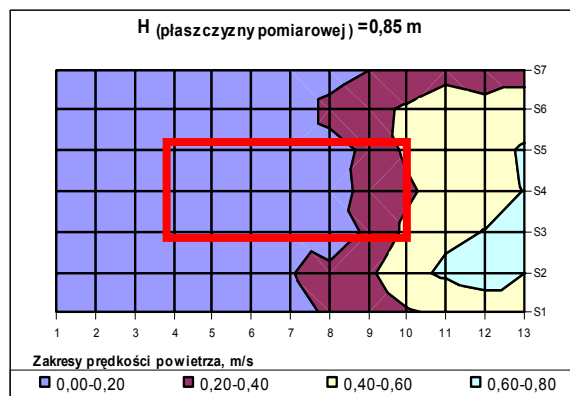


Rys. 2.93 Rozkład pól prędkości powietrza w obszarze działania nawiewnika dla poziomej płaszczyzny pomiarowej ciętej na wysokości  $H=1,35m$ ;



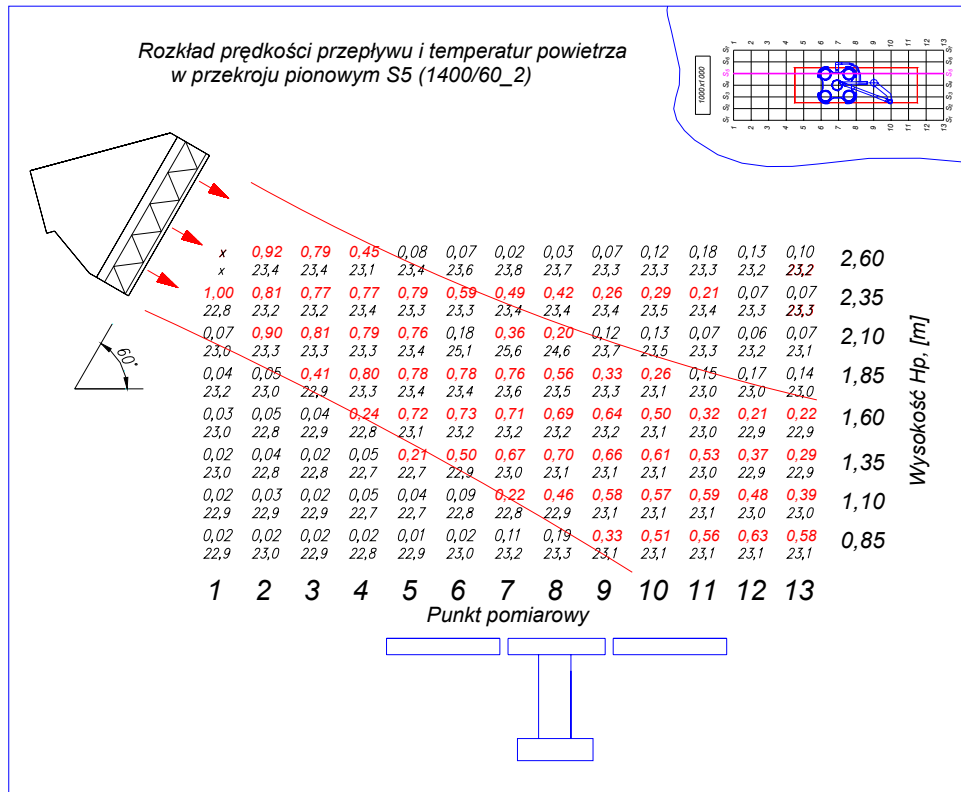


Rys. 2.94 Rozkład pól prędkości powietrza w obszarze działania nawiewnika dla poziomej płaszczyzny pomiarowej ciętej na wysokości  $H=1,10\text{m}$ ;

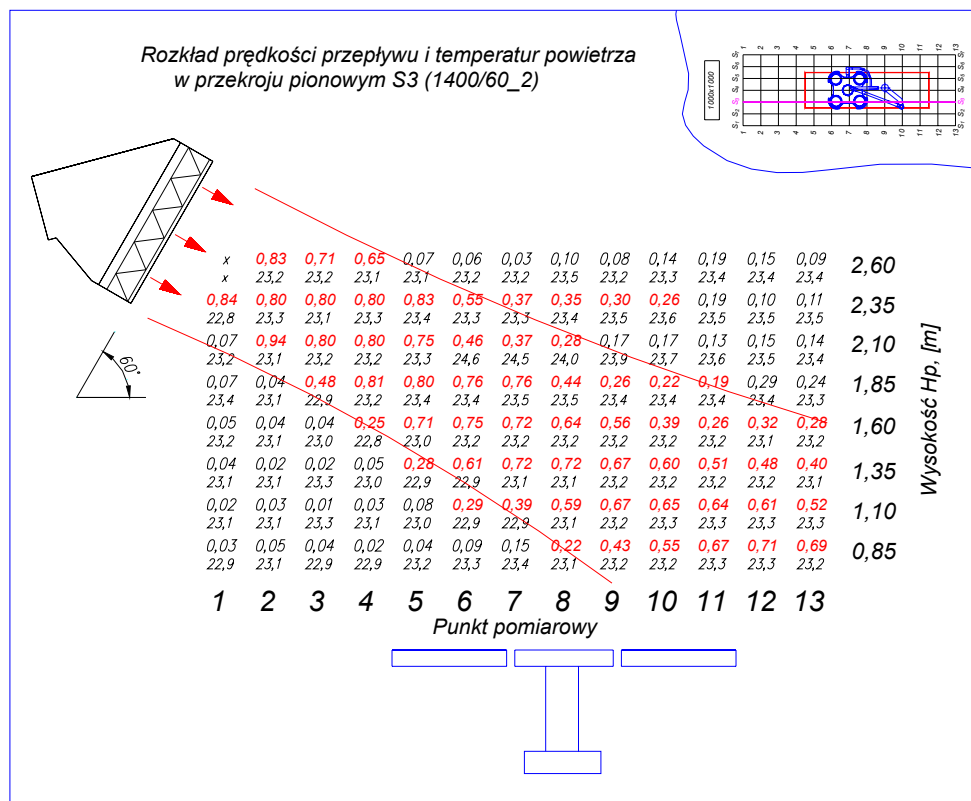


Rys. 2.95 Rozkład pól prędkości powietrza w obszarze działania nawiewnika dla poziomej płaszczyzny pomiarowej ciętej na wysokości  $H=0,85\text{m}$ ;

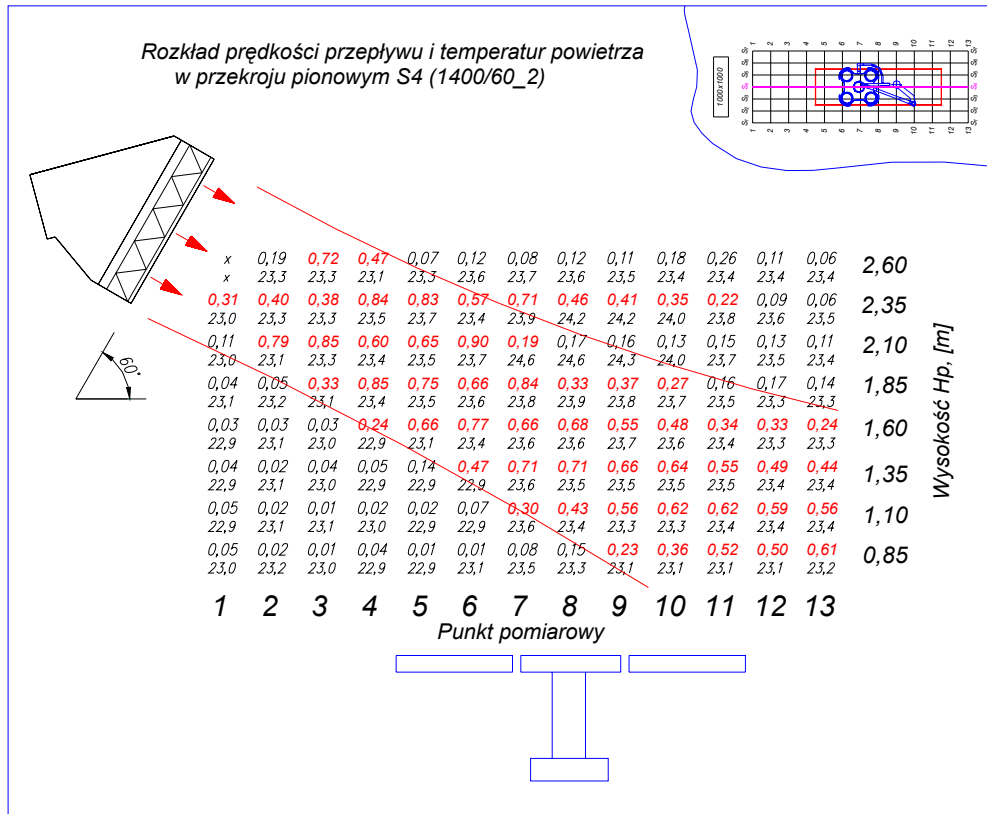
Sam charakter wypływu powietrza z nawiewnika zbliżony jest do wypływów z prostokątnych otworów pionowych [83]. Z rys. 2.89, widać że struga powietrza rozmyta jest na znacznie większej długości niż występowało to w obu poprzednio omawianych wersjach (pkt. 5.5.2.1 oraz 5.5.2.2). Na rys. 2.88, 2.89, 2.90, 2.91, daje się zauważyć proces kształtowania się właściwej strugi nawiewnej. Wobec pochylenia nawiewnika pod kątem  $60^{\circ}$  do płaszczyzny stołu operującego, strefa przejściowa wydłuża się w porównaniu z poprzednio opisywanymi wersjami. W pełni ukształtowaną strugę zauważyć możemy dopiero na wysokości  $H=1,60\text{ m}$ . Jednolite pole prędkości ( $0,60 - 0,80\text{ m/s}$ ) zaznaczono kolorem niebieskim na rys. 2.92. Następnie struga kieruje się w stronę stołu operacyjnego, jednakże nie trafia w istotny dla nas obszar krytyczny, lecz nieco dalej, co widać z rys. 2.94 i rys. 2.93. Rozkład prędkości w przekrojach pionowych widoczny jest z rys. 2.96, 2.97, 2.98 i fotografii (rys. 2.99) przedstawiającej zadymiony strumień powietrza nawiewanego. Granice przebiegu strugi nawiewnej zaznaczono na rysunkach kolorem czerwonym.



Rys.2.96 Rozkład prędkości przepływu powietrza w obszarze działania nawiewnika w pionowej płaszczyźnie pomiarowej, przebiegającej wzdłuż osi wyznaczonej przez punkty S5-S5



Rys.2.97 Rozkład prędkości przepływu powietrza w obszarze działania nawiewnika w pionowej płaszczyźnie pomiarowej, przebiegającej wzdłuż osi wyznaczonej przez punkty S3-S3



Rys.2.98 Rozkład prędkości przepływu powietrza w obszarze działania nawiewnika w pionowej płaszczyźnie pomiarowej, przebiegającej wzdłuż osi wyznaczonej przez punkty S4-S4



Rys.2.99 Widok z boku strugi nawiewnej 'przelatującej' nad obszarem krytycznym – wizualizacja poprzez zadymianie;  $V=1400 \text{ m}^3/\text{h}$ , kąt pochylenia nawiewnika  $60^\circ$ , stół poz. 2

### 5.5.3 Krótkie podsumowanie

Z badań przeprowadzonych w II etapie pracy można wysunąć wniosek o uzyskaniu zadawalających wyników. Najbardziej pożądane wyniki uzyskano dla kombinacji (jednej z 27 badanych), gdy kąt pochylenia płaszczyzny nawiewnej wynosił  $45^{\circ}$  (do płaszczyzny stołu operacyjnego), strumień powietrza nawiewanego  $V=1400 \text{ m}^3/\text{h}$ ; a stół operacyjny był w poz.1. Średnia prędkość powietrza na wypływie z nawiewnika wynosiła  $w = 0,40 \text{ m/s}$  w przekroju brutto płaszczyzny nawiewnej. Okazało się to wystarczające aby sprowadzić strugę powietrza sterylne, bez zakłóceń w obszar krytyczny stołu operacyjnego (pokonać opory spowodowane siłą *Archimedes*), przy użyciu zaproponowanego i omówionego w pracy prototypowego nawiewnika skośnego, własnej konstrukcji – SLANtinG. Taki nawiew działa w sposób zbliżony dla wyporowego systemu przepływu powietrza, a zasada wypierania osłabia w opisanych przypadkach, mieszanie powietrza nawiewanego z tym znajdującym się już w sali. Uchwycone na fotografiach przykłady z zadymionymi strumieniami nawiewnymi wskazują na charakter wpływu zbliżony do laminarnego (rys.2.73, 2.86, 2.99).

### 5.6 WIZUALIZACJA ZJAWISK ZADYMIONYMI STRUMIENIAMI NAWIEWNYMI

Pełnej informacji o rozkładzie prędkości oraz przepływie powietrza dostarczają łącznie: analiza wyników pomiarów prędkości oraz zdjęcia rozplywu powietrza. Dlatego dodatkową ilustracją przeprowadzonych badań są zdjęcia przedstawiające wnętrze modelowej sali operacyjnej z zadymionymi strumieniami powietrza nawiewanego. Część tych zdjęć została już zaprezentowana, przy okazji szczegółowego omawiania uzyskanych wyników pomiarów (rozdz.5.5). Należy zwrócić uwagę, iż dokładne pomiary prędkości i temperatur powietrza (w zakresie zaproponowanym w badanej pracy), tj. w punktach przestrzeni tworzących gęstą siatkę pomiarową, są możliwe jedynie w warunkach ‘at rest’ (w czasie postoju) sali operacyjnej. Przeprowadzenie podobnych badań ‘at operational’ (w czasie trwania zabiegów operacyjnych), jest ze względów technicznych niemożliwe. Strumień powietrza nawiewanego, zwłaszcza o charakterze laminarnym jest bardzo wrażliwy na wszelkie zakłócenia. Błędem byłoby zatem przyjęcie uzyskanych wyników badań jako w pełni normatywnych dla warunków rzeczywistych. Ponieważ w przeprowadzonych badaniach pominięto personel operujący (stanowiący istotny element zakłócający przepływ powietrza). Jednakże, przy założeniu rozmieszczenia personelu operującego, w sali operacyjnej odpowiadającemu stanowi faktycznemu dla większości przeprowadzanych zabiegów i operacji (tj. operatorzy stojący po bokach stołu operującego, personel pomocniczy za nimi oraz anestezjolog siedzący za głową operowanego – wolna

przestrzeń od strony nóg pacjenta) przewiduje się, iż zachowanie się strugi powietrza nawiewnego będzie bliskie temu z badań.

Dla potwierdzenia wysuwanych tez uwidoczniło procesy rozptyłu powietrza, także w obecności zespołu operującego oraz operowanego (których zastępowali studenci). Fotografie z przeprowadzonych badań przedstawiono na *rys.2.100 - 2.108*. Charakterystykę przepływu powietrza wyznaczano poprzez zadymianie strumienia powietrza nawiewanego już w samym laboratorium.

Obrys wypływającego strumienia powietrza widoczny na zdjęciach: *rys.2.100, rys.2.101, rys.2.103, rys.2.104*, dowodzi iż obszar stołu operacyjnego jest całkowicie omywany powietrzem nawiewanym. Szczególnie dobrze widoczne jest to na fotografii – *rys.2.104*, gdzie przestrzeń wewnętrzną w bezpośrednim sąsiedztwie operowanego, ograniczona przez symulowanych operatorów, po obu stronach stołu cała wypełniona jest dymem.

Ze zdjęć w *rys.2.100, rys.2.101 i rys.2.103*, widać ponadto, że pojawienie się zespołu operatorów nie powoduje istotnych dodatkowych zakłóceń w przepływie strugi nawiewnej. Powietrze po wypływie z nawiewnika ‘wciska’ (przyp. autor) się pomiędzy stojących dookoła operatorów, omywając obszar krytyczny sterylnym powietrzem. Natomiast na podstawie zdjęć: *rys.2.100, rys.2.105, rys.2.106*, można zauważyć, że obszar pracy chirurgów i anestezjologów nie jest intensywnie omywany bezpośrednio nawiewanym strumieniem powietrza, co można uznać za pewną wadę proponowanego systemu.



*Rys.2.100 Wizualizacja rozptyłu powietrza z zasymulowanym zespołem operującym – widok od strony nawiewnika; parametry dla wariantu:  $V=1400\text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\alpha=45^\circ$ , stół poz.1*



*Rys.2.101 Wizualizacja rozptyłu powietrza z zasymulowanym zespołem operującym – widok z boku; parametry dla wariantu:  $V=1400\text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\alpha=45^\circ$ , stół poz.1*



Rys.2.102 Wizualizacja rozplywu powietrza z zasymulowanym zespołem operującym – widok od strony nóg operowanego; parametry dla wariantu:  $V=1400\text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\alpha=45^\circ$ , stół poz.1



Rys.2.103 Widok strugi nawiewnej wypływającej z nawiewnika (z prawej strony) z zasymulowanym zespołem operującym) oraz samym operowanym; parametry dla wariantu  $V=1400\text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\alpha=45^\circ$ , stół poz.1



Rys.2.104 Wizualizacja rozplywu powietrza – widok od strony miejsca zajmowanego w rzeczywistości przez anestezjologa; parametry dla wariantu  $V=1400\text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\alpha=45^\circ$ , stół poz.1



Rys.2.105 Wizualizacja rozplywu powietrza – widok zza pleców anestezjologa; parametry dla wariantu  $V=1400\text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\alpha=45^\circ$ , stół poz.1



Rys.2.107 Widok stanowiska badawczego od strony głowy pacjenta; sytuacja jeszcze przed zadymianiem; parametry dla wariantu  $V=1400\text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\alpha=45^\circ$ , stół poz.1



Rys.2.106 Widok stanowiska badawczego z góry; sytuacja jeszcze przed zadymianiem; parametry dla wariantu  $V=1400\text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\alpha=45^\circ$ , stół poz.1

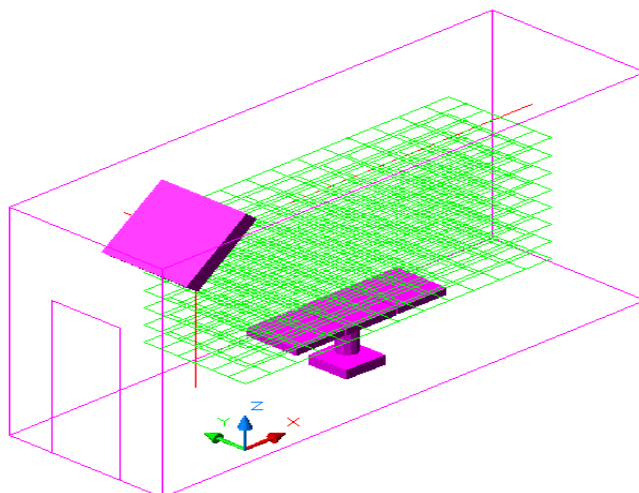


Rys.2.108 Wizualizacja rozplywu powietrza – widok z góry; parametry dla wariantu  $V=1400\text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\alpha=45^\circ$ , stół poz.1

## 6. MODEL TEORETYCZNY ROZKŁADU PRĘDKOŚCI DLA ZAPROPONOWANEGO SYSTEMU ORGANIZACJI WYMIANY POWIETRZA

### 6.1 WPROWADZENIE

Podstawowym wymogiem poprawnej organizacji wymiany powietrza w salach operacyjnych jest doprowadzenie sterylnego powietrza w strefę obszaru krytycznego. Kluczowe znaczenie mają prędkości powietrza w strudze nawiewnej. Znajomość rozkładów pól prędkości powietrza, dla określonego układu organizacji wymiany powietrza w pomieszczeniu, już w fazie projektowej jest bardzo pożądana. Uzyskane wyniki badań stanowią bazę wyjściową dla utworzenia modelu matematycznego opisującego rozkład prędkości powietrza w obszarze działania nawiewnika skośnego poddanego analizie. W celu wyznaczenia modelu korzystano ze znanych narzędzi do analizy statystycznej danych doświadczalnych, m.in. aplikacji komputerowej *STATISTICA ver.5.1 PL*.



Rys. 2.109 Schemat przestrzenny stanowiska pomiarowego dla wyznaczenia modelu

#### 6.1.1 Dane wejściowe:

$Q$  [m<sup>3</sup>/h] ∈ ⟨1400; 1800⟩ - strumień powietrza nawiewanego;

$\alpha$  [°] ∈ ⟨30; 60⟩ - kąt nachylenia płaszczyzny nawiewnika względem podłogi sali operacyjnej;

$x_0^A$  [m] ∈ ⟨0; 3,6⟩ - odległość punktu A przestrzeni sali operacyjnej od środka badanego nawiewnika w kierunku osi  $X$  (wzdłuż stołu operacyjnego);

$y_0^A$  [m] ∈ ⟨-0,6; +0,6⟩ - odległość punktu A przestrzeni sali operacyjnej od środka badanego nawiewnika w kierunku osi  $Y$  (w poprzek stołu operacyjnego);

$z_0^A$  [m] ∈ ⟨0,10; 1,85⟩ - odległość punktu A przestrzeni sali operacyjnej od środka badanego nawiewnika w kierunku osi  $Z$  (prostopadle do stołu operacyjnego);

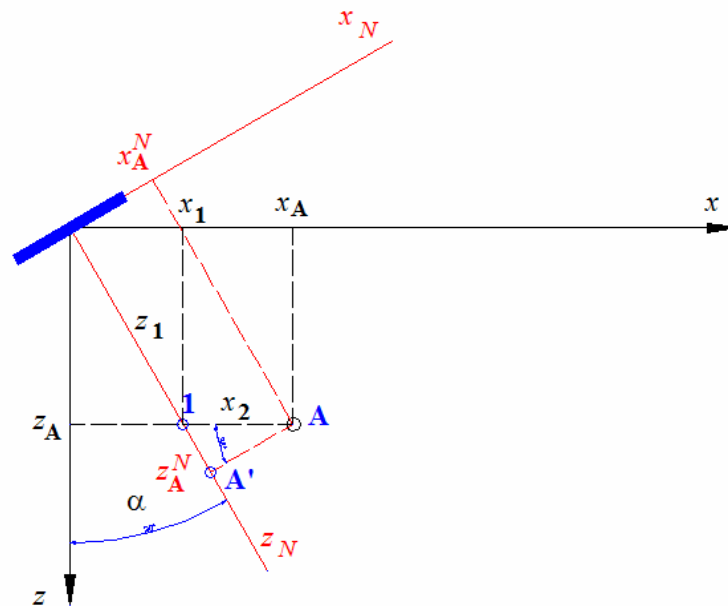


### 6.1.2 Dane wyjściowe:

$v^A$  [m/s] – prędkość powietrza w punkcie A przestrzeni sali operacyjnej.

## 6.2 PRZEJŚCIE Z KARTEZJAŃSKIEGO UKŁADU WSPÓLRZĘDNYCH $x_0, y_0, z_0$ (ZWIĄZANEGO Z SALĄ OPERACYJNĄ) DO UKŁADU ZWIĄZANEGO Z ŚRODKIEM NAWIEWNIKA $x_N, y_N, z_N$ OBRÓCONEGO O KĄT $\alpha$ :

Celem uporządkowania zebranych danych doświadczalnych przyjęto trójwymiarowy układ współrzędnych kartezjańskich  $Oxz$ . Założono, że jego początek znajduje się w środku nawiewnika (wszystkie współrzędne pionowe:  $z=2,70-H$ ). Wprowadzono nowy układ współrzędnych  $Ox^Nz^N$  obrócony względem układu  $Oxz$  o kąt  $\alpha$  (rys.2.109), dla którego oś  $z^N$  jest prostopadła do płaszczyzny nawiewnej dla dowolnego kąta pochylenia nawiewnika  $\alpha$ . Albowiem uzyskane wyniki badań wskazują, że na wartość prędkości powietrza w funkcji odległości od nawiewnika, kąt pod jakim powietrze wprowadzane jest do sali, nie ma istotnego wpływu.



Rys. 2.110 Transformacja układu współrzędnych (niebieska pogrubiona linia obrazuje płaszczyznę nawiewną; czerwonymi liniami zaznaczono obrócony układ współrzędnych; czarnymi liniami – pierwotny układ współrzędnych)

### 6.2.1 Dane wejściowe:

$\alpha, x_0^A, y_0^A, z_0^A$

### 6.2.2 Dane wyjściowe:

Współrzędne punktów pomiarowych przeliczono na nowy układ współrzędnych wykorzystując zależności trygonometryczne:

$$z_1 = \frac{z_A}{\cos \alpha}; \quad x_1 = z_A \cdot \operatorname{tg} \alpha; \quad x_2 = x_A - z_A \cdot \operatorname{tg} \alpha; \quad (2.1)$$

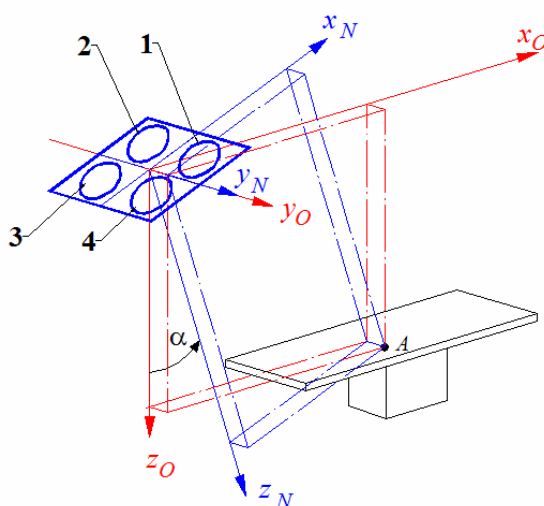
$$x_A^N = x_2 \cdot \cos \alpha = (x_A - z_A \cdot \operatorname{tg} \alpha) \cdot \cos \alpha; \quad y_A^N = y_A; \quad (2.2)$$

$$z_A^N = \frac{z_A}{\cos \alpha} + x_2 \cdot \sin \alpha = \frac{z_A}{\cos \alpha} + (x_A - z_A \cdot \operatorname{tg} \alpha) \cdot \sin \alpha; \quad (2.3)$$

Następnie układ ten zamieniono na układ współrzędnych walcowych:

$$R = \sqrt{x_N^2 + y_N^2}; \quad (2.4)$$

$$z_N = z_A / \cos \alpha + x_2 \cdot \sin \alpha = z_A / \cos \alpha + (x_A - z_A \cdot \operatorname{tg} \alpha) \cdot \sin \alpha \quad (2.5)$$



Rys. 2.111 Przyjęte układy współrzędnych w ujęciu przestrzennym

### 6.3 ZAŁOŻENIA DO MODELU MATEMATYCZNEGO

W wyniku transformacji układu współrzędnych zredukowano liczbę zmiennych niezależnych z pięciu:  $v = f(x, y, z, \alpha, Q)$  do trzech:  $v = f(Q, z_N, R)$ . Zmienne te podano standaryzacji w celu uzyskania zmiennych bezwymiarowych:

$$x_i^{(1)} = \frac{Q_i - \bar{Q}}{s_Q}; \quad x_i^{(2)} = \frac{z_i - \bar{z}}{s_z}; \quad x_i^{(3)} = \frac{R_i - \bar{R}}{s_R}$$

gdzie  $i = 1, 2, 3 \dots 6552$

$x_i^{(1)}$  – bezwymiarowe  $Q$  (strumień powietrza nawiewanego)

$x_i^{(2)}$  – bezwymiarowe  $z_N$  (odległość punktu na osi  $z_N$  od środka nawiewnika  $O$ )

$x_i^{(3)}$  – bezwymiarowe  $R$  (odległość dowolnego punktu  $A$  w przestrzeni od osi  $z_N$ )

Formułowanie modelu matematycznego przy użyciu zmiennych bezwymiarowych pozwala na ściśle powiązanie zmiennych fizycznych opisujących badane zjawisko.

Szukano bezwymiarowej prędkości w dowolnym punkcie przestrzeni  $A$  zdefiniowanej jako:

$$y_i = \frac{v_i - \bar{v}}{s_v} \quad (2.6)$$

Seria pomiarów prędkości powietrza wykonanych w 728 punktach (13x7x8) dała 6552 wyników, co stworzyło macierz zmiennych o wymiarach 4x6552. Zmienne te poddano standaryzacji. Podstawowe statystyki danych pomiarowych zestawiono w *tab.2.1*.

*Tab.2.1* Podstawowe własności statystyczne danych pomiarowych

STATYSTYKA	Q	z	R	V
<b>Liczebność</b>	6552	6552	6552	6552
<b>Średnia</b>	1600 m <sup>3</sup> /h	1,921m	1,021m	0,2608 m/s
<b>Odchylenie stand.</b>	163,3	0,903	0,640	0,2681
<b>Minimum</b>	1400 m <sup>3</sup> /h	0,05m	0,00m	0,002 m/s
<b>Maksimum</b>	1800 m <sup>3</sup> /h	4,04 m	3,13m	1,318 m/s

Analiza wyników pomiarów prędkości powietrza w postaci wykresów warstwicznych wykazała, że spośród zbioru parametrów  $\langle Q, z_N, R \rangle$  uzasadniane jest poszukiwanie związku korelacyjnego typu:  $v = f(Q, z_N, R)$ .

Ruch powietrza w pomieszczeniach jest określony przez nieregularne miejscowe i czasowe wahania prędkości powietrza pod względem kierunku i wartości. Te są powodowane nie tylko w wyniku nawiewu i wywiewu powietrza, lecz również przez prądy konwekcyjne od osób, urządzeń, grzejników, lamp, ścian, okien itd. Powstaje skomplikowany obraz, który można przedstawić jedynie metodami statystycznymi. Z badań wynika, że w większości, rozkład wahań prędkości powietrza względem wartości średniej następuje według tzw. rozkładu normalnego (krzywej Gaussa). [60]

## 6.4 OSZACOWANIE PRĘDKOŚCI MAKSYMALNEJ W PRZEKROJU ODDALONYM OD NAWIEWNIKA O $z_N$

### 6.4.1 Dane wejściowe:

$$Q, z_N^A$$

### 6.4.2 Dane wyjściowe:

Zależność uzyskana na podstawie metod analizy statystycznej, bazująca na wynikach przeprowadzonych badań, na wartość prędkości maksymalnej w obszarze działania nawiewnika skośnego, przedstawia równanie 2.7.

$$v_{\max}^A = b_0 + b_1 \cdot Q + b_2 \cdot z_N^A \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} \text{gdzie: } b_0 &= 0,172 \text{ [m/s];} \\ b_1 &= 0,00062 \text{ [1/m}^2\text{];} \\ b_2 &= -0,138 \text{ [1/s];} \end{aligned}$$

Zatem końcowe równanie przyjmuje postać (2.8):

$$v_{\max} = 0,172 + 0,00062 \cdot Q - 0,138 \cdot z_N, \quad (2.8)$$

Obowiązuje dla poniższych zakresów zmiennych:

$$\begin{aligned} z_N &\in \langle 0,35; 3,10 \rangle; \text{ [m]} \\ Q &\in \langle 1400; 1800 \rangle; \text{ [m}^3\text{/h]} \end{aligned}$$

## 6.5 OSZACOWANIE PARAMETRÓW CZTERECH TURBULENTNYCH STRUG SWOBODNYCH WG WZORU POTĘGOWEGO PRANDTLA

Przyjęto, że przepływ powietrza w pomieszczeniach klimatyzowanych ma charakter burzliwy, a do zapisu jego ruchu przyjęto wzór *Prandtla*. Ponadto założono, że powietrze podlega prawom gazu doskonałego.

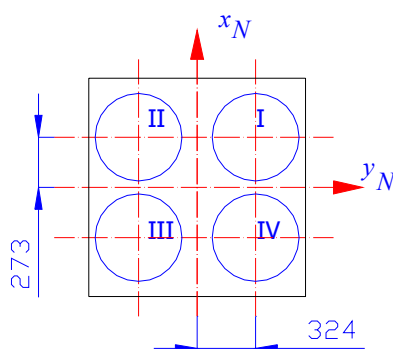
Wzór potęgowy *Prandtla* na prędkość  $v$  [m/s]:

$$\begin{cases} v = v_{\max} \cdot \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} & \text{dla } \frac{r}{R} < 1 \\ v = 0 & \text{dla } \frac{r}{R} \geq 1 \end{cases} \quad (2.9)$$

gdzie:

$$r = \sqrt{x_N^2 + y_N^2}, [\text{m}] \quad (2.10)$$

Dla nawiewnika, o konstrukcji powodującej, iż w początkowej strefie kształtowania strugi nawiewnej, otrzymano cztery strugi cząstkowe (cztery filtry absolutne stanowiące płaszczyznę nawiewu) wystarczająco dobrym, dla zastosowań technicznych, modelem rzeczywistego rozkładu pola prędkości w układzie przestrzennym  $x_N, y_N, z_N$  jest superpozycja tych czterech strug swobodnych.



Rys. 2.112 Schemat przedstawiający cztery strugi swobodne wypływające z badanego nawiewnika

### 6.5.1 Dane wejściowe:

$$x_N^A, y_N^A, z_N^A$$

### 6.5.2 Dane wyjściowe:

$$R = a_0 + a_1 \cdot z_N^A, [\text{m}] \quad (2.11)$$

$$\text{gdzie: } a_0 = 0,37 [\text{m}]$$

$$a_1 = 0,059 [-]$$

Zatem końcowe równanie przyjmuje postać (2.12):

$$R = 0,37 + 0,059 \cdot z_N, [\text{m}] \quad (2.12)$$

$$r_{(1)}^A = \sqrt{(x_N^A - \Delta x)^2 + (y_N^A - \Delta y)^2}, [\text{m}] \quad (2.13)$$

$$r_{(2)}^A = \sqrt{(x_N^A - \Delta x)^2 + (y_N^A + \Delta y)^2}, [\text{m}] \quad (2.14)$$

$$r_{(3)}^A = \sqrt{(x_N^A + \Delta x)^2 + (y_N^A + \Delta y)^2}, [\text{m}] \quad (2.15)$$

$$r_{(4)}^A = \sqrt{(x_N^A + \Delta x)^2 + (y_N^A - \Delta y)^2}, [\text{m}] \quad (2.16)$$

gdzie:  $\Delta x = 0,324 [\text{m}]$

$\Delta y = 0,273 [\text{m}]$

Zmienne standaryzowane zawierają się w zakresach:

$$X_1 \in \langle -1,225; +1,225 \rangle,$$

$$X_2 \in \langle -2,07; +2,36 \rangle,$$

$$X_3 \in \langle -1,595; +3,289 \rangle,$$

$$Y \in \langle -0,97; +3,97 \rangle$$

## 6.6 OSZACOWANIE SKŁADOWYCH PRĘDKOŚCI OD CZTERECH STRUG SWOBODNYCH WG WZORU POTĘGOWEGO PRANDTLA

### 6.6.1 Dane wejściowe:

$$r_{(1)}^A, r_{(2)}^A, r_{(3)}^A, r_{(4)}^A, R$$

### 6.6.2 Dane wyjściowe:

$$v_{(1)}^A = \begin{cases} 0 & \text{dla } \frac{r_{(1)}^A}{R} \geq 1 \\ v_{\max}^A \cdot \left(1 - \frac{r_{(1)}^A}{R}\right)^n & \text{dla } \frac{r_{(1)}^A}{R} < 1 \end{cases} \quad (2.17)$$

$$v_{(2)}^A = \begin{cases} 0 & \text{dla } \frac{r_{(2)}^A}{R} \geq 1 \\ v_{\max}^A \cdot \left(1 - \frac{r_{(2)}^A}{R}\right)^n & \text{dla } \frac{r_{(2)}^A}{R} < 1 \end{cases} \quad (2.18)$$

$$v_{(3)}^A = \begin{cases} 0 & \text{dla } \frac{r_{(3)}^A}{R} \geq 1 \\ v_{\max}^A \cdot \left(1 - \frac{r_{(3)}^A}{R}\right)^n & \text{dla } \frac{r_{(3)}^A}{R} < 1 \end{cases} \quad (2.19)$$

$$v_{(4)}^A = \begin{cases} 0 & \text{dla } \frac{r_{(4)}^A}{R} \geq 1 \\ v_{\max}^A \cdot \left(1 - \frac{r_{(4)}^A}{R}\right)^n & \text{dla } \frac{r_{(4)}^A}{R} < 1 \end{cases} \quad (2.20)$$

gdzie:  $n = 1,587$

## 6.7 OSZACOWANIE PRĘDKOŚCI POWIETRZA W DOWOLNYM PUNKCIE A PRZESTRZENI

Prędkość powietrza w dowolnym punkcie A przestrzeni sali operacyjnej szacujemy jako superpozycje prędkości obliczonych z czterech strumieni cząstkowych (2.17, 2.18, 2.19 i 2.20).

### 6.7.1 Dane wejściowe:

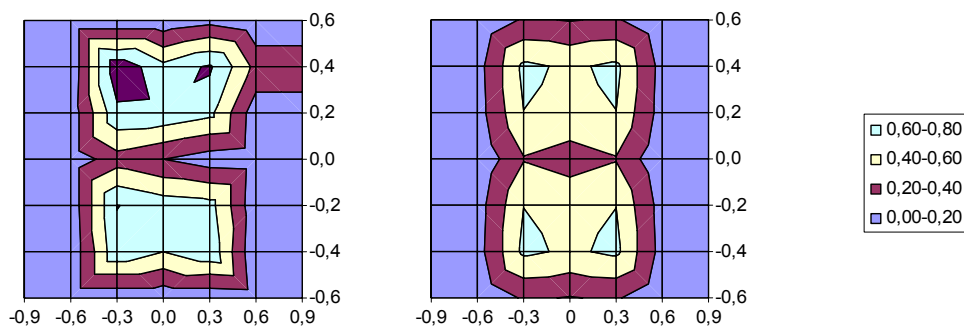
$$v_{(1)}^A, v_{(2)}^A, v_{(3)}^A, v_{(4)}^A$$

### 6.7.2 Dane wyjściowe:

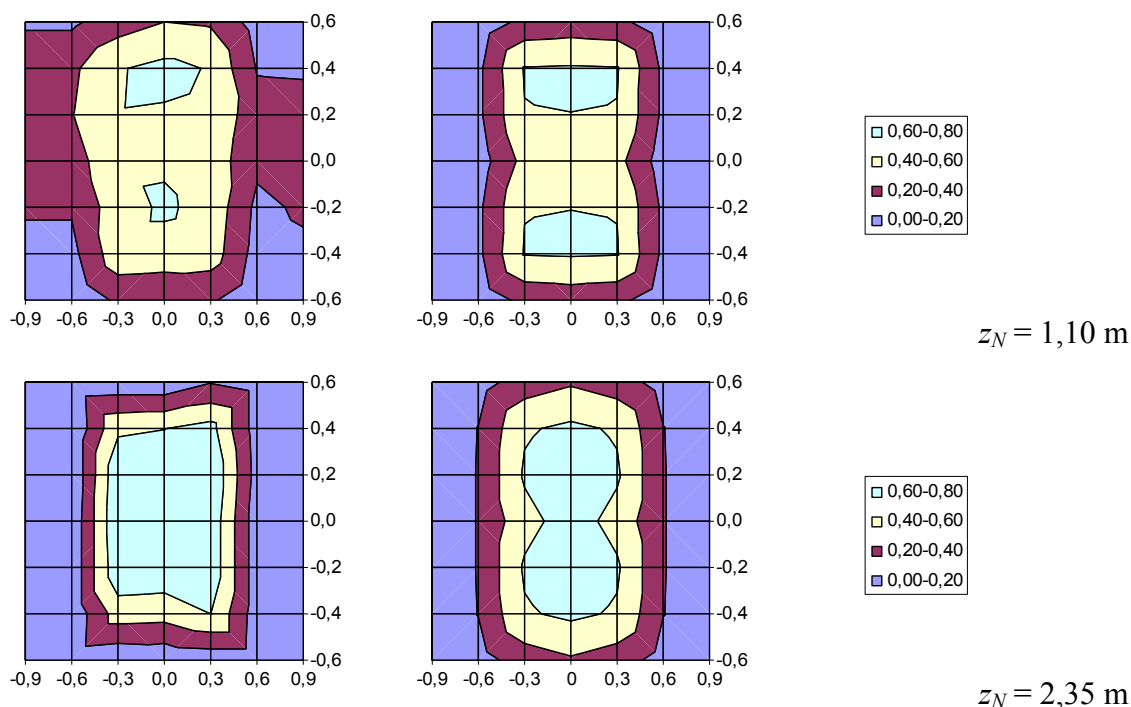
$$v^A = v_{(1)}^A + v_{(2)}^A + v_{(3)}^A + v_{(4)}^A \quad (2.21)$$

## 6.8 WERYFIKACJA MODELU

Dla weryfikacji otrzymanego modelu, porównano wartości zmierzone w badaniach z uzyskanymi przy użyciu proponowanego modelu, dla trzech przykładowych płaszczyzn prostopadłych do osi nawiewnika oddalonych odpowiednio o:  $z_N=(0,35; 1,10; 2,35)$  (rys.2.113).



$z_N = 0,35 \text{ m}$

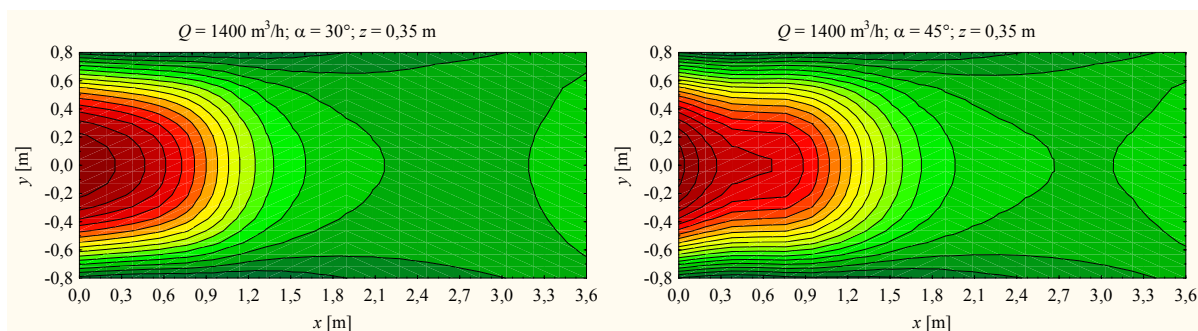


Rys.2.113 Wykresy warstwiczne dla  $Q = 1400 \text{ m}^3/\text{h}$   
w lewej kolumnie – wynik pomiarów, w prawej – model teoretyczny

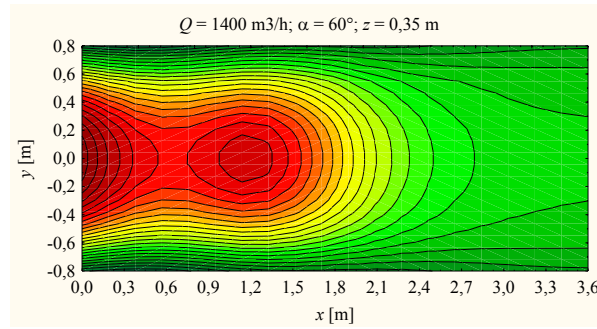
Z porównania powyższych wykresów warstwicznych widać, iż otrzymany model teoretyczny odnoszący się do ruchu powietrza wypływającego z badanego nawiewnika skośnego może stanowić skuteczne narzędzie dla przewidywania zachowania się powietrza w warunkach rzeczywistych.

## 6.9 UKŁAD WSPÓLRZĘDNYCH ZWIĄZANY Z SALĄ OPERACYJNĄ

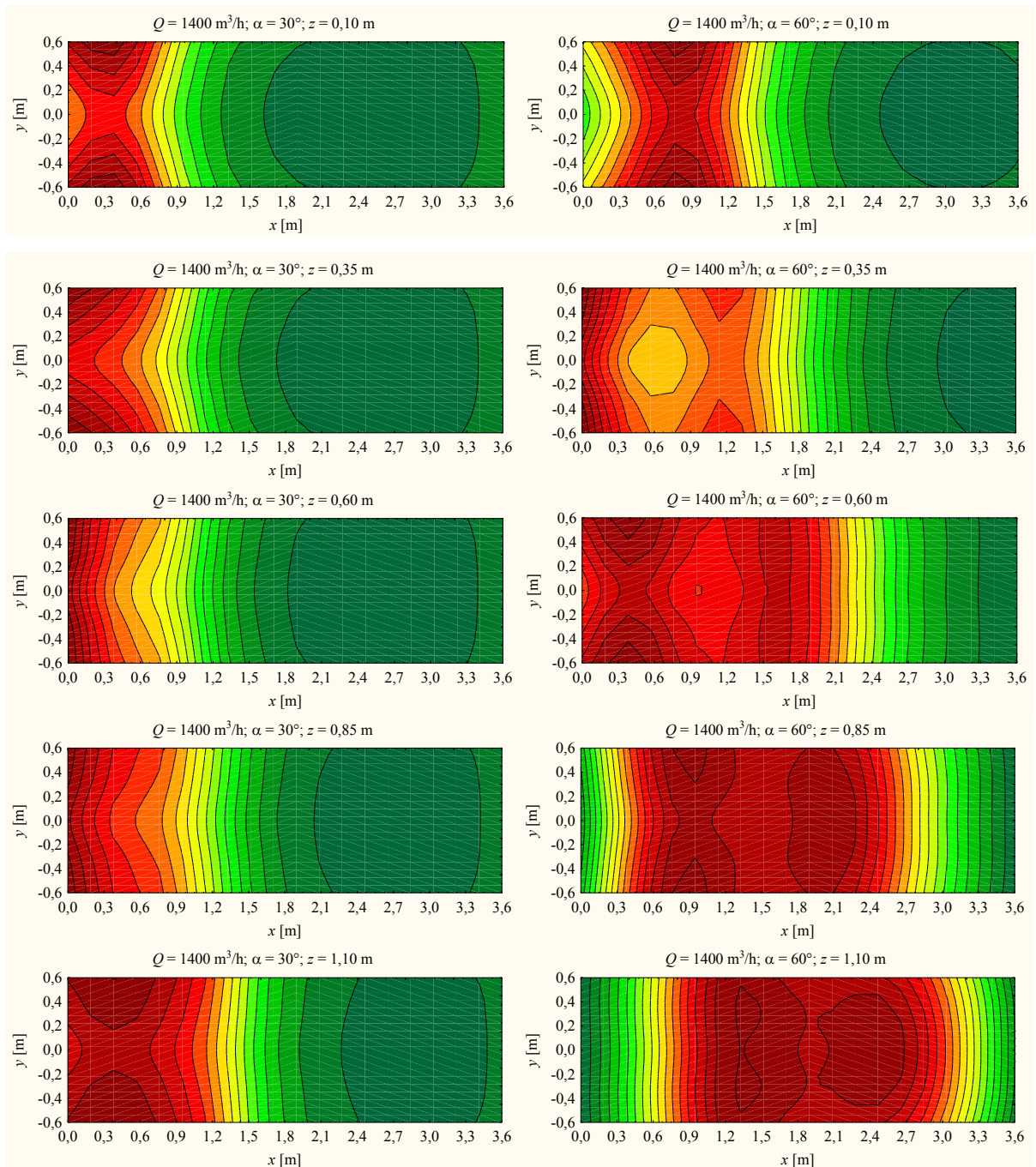
Kolejne wykresy (rys.2.114, rys.2.115, rys.2.116) przedstawiają przewidywany rozkład prędkości w układzie współrzędnych pomiarowych, w oparciu o otrzymany model, dla danych opisanych przy wykresach.

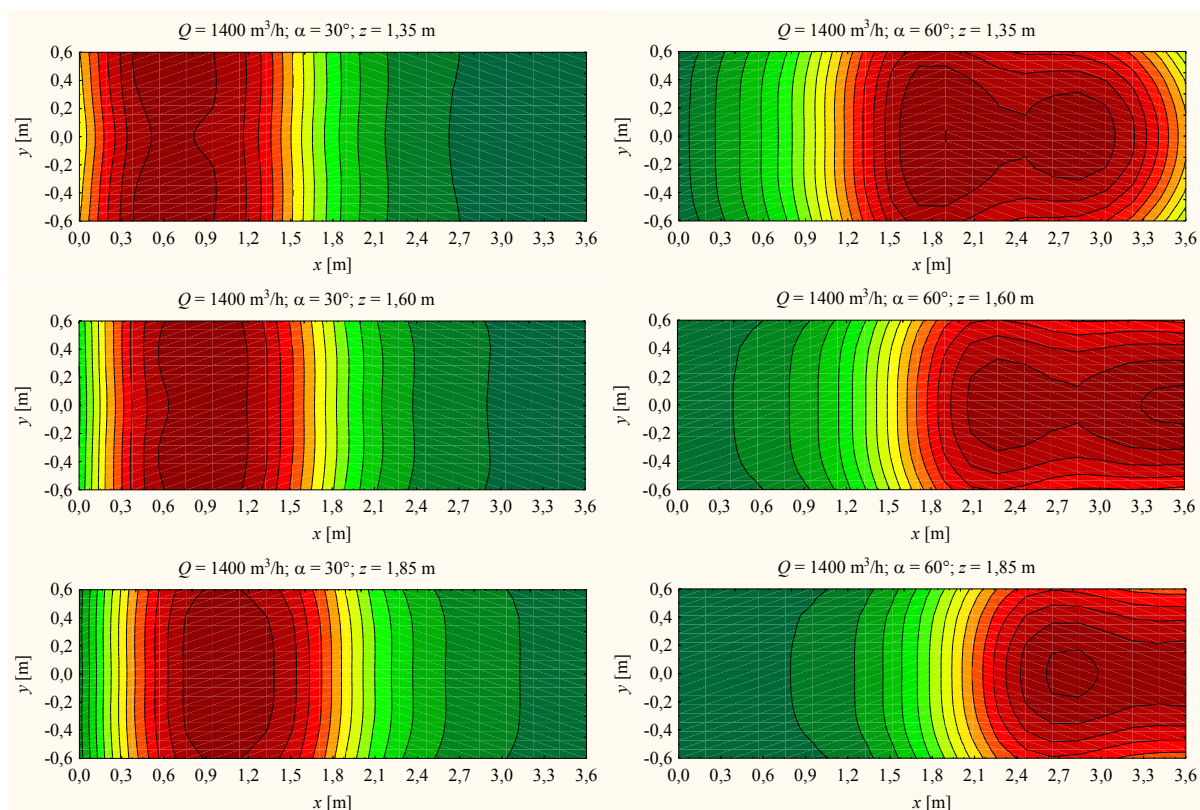






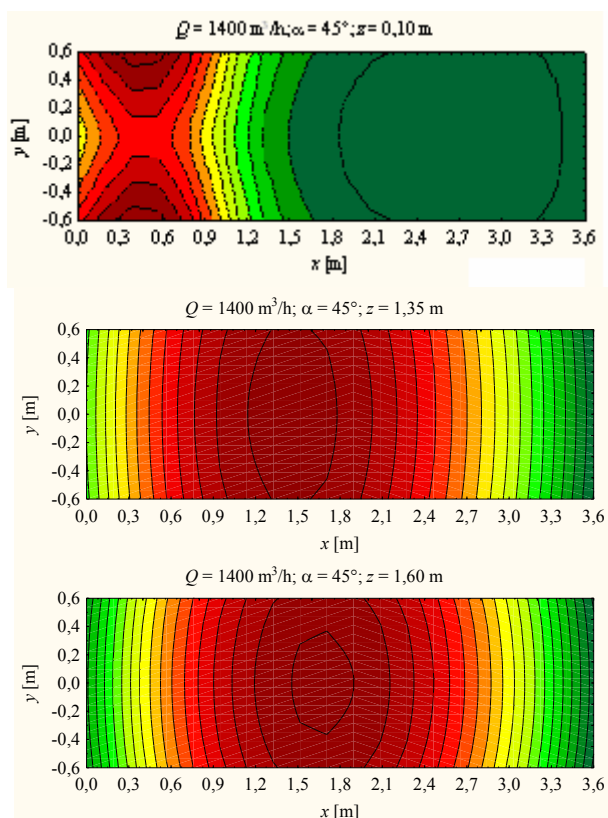
Rys. 2.114 Modelowy rozkład prędkości w układzie współrzędnych pomiarowych dla  $Q = 1400 \text{ m}^3/\text{h}$  i  $z = 0,35 \text{ m}$  oraz różnych kątów pochylenia nawiewnika ( $30, 45, 60^\circ$ )

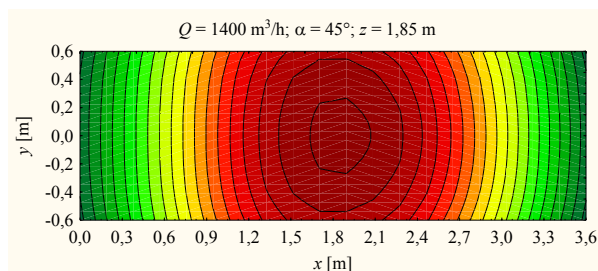




Rys. 2.115 Modelowy rozkład prędkości w układzie współrzędnych pomiarowych dla  $Q = 1400 \text{ m}^3/\text{h}$  i  $z = 1,60$  i  $1,85 \text{ m}$  oraz kąta pochylenia nawiewnika  $30^\circ$

Rys. 2.116 Modelowy rozkład prędkości w układzie współrzędnych pomiarowych dla  $Q = 1400 \text{ m}^3/\text{h}$  i  $z = 1,60$  i  $1,85 \text{ m}$  oraz kąta pochylenia nawiewnika  $60^\circ$





Rys. 2.117 Modelowy rozkład prędkości w układzie współrzędnych pomiarowych dla:  $Q = 1400 \text{ m}^3/\text{h}$  i  $z = 0,10\text{m}; 1,60\text{m}$  i  $1,85\text{m}$  oraz kąta pochylenia nawiewnika  $45^\circ$

## 6.10 PODSUMOWANIE

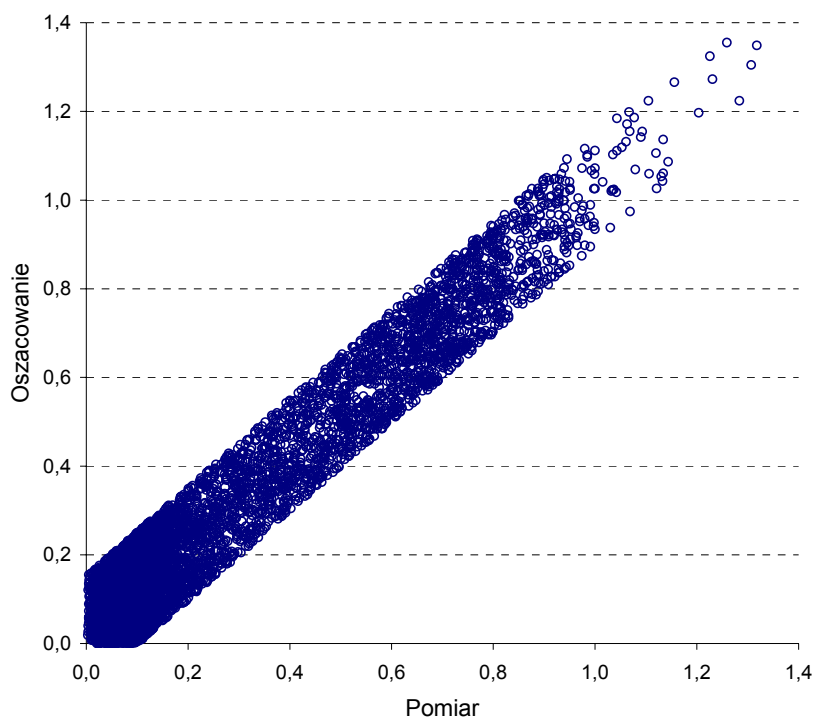
Korzystając z arkusza kalkulacyjnego *Microsoft Excel*, utworzono algorytm, umożliwiający określenie przewidywanej wartości prędkości, w dowolnym punkcie przestrzeni trójwymiarowej. Program obliczeniowy o roboczej nazwie 'Calculator4G' poprawny jest w zakresie podanych wcześniej zmiennych standaryzowanych. Umożliwia wyznaczenie przewidywanej prędkości powietrza dla dowolnych warunków mieszczących się w przeanalizowanym zakresie parametrów wejściowych, w szczególności stałych źródeł ciepła oraz przy zachowaniu izotermicznego charakteru strumienia powietrza nawiewanego.

Poniżej przedstawiono fragment zdjęcia ekranu z arkusza kalkulacyjnego *Microsoft Excel*, przedstawiające tabelę służącą do wprowadzania danych i obliczania wyniku (rys.2.118).

Microsoft Excel - Kalkulator				
Dane wejściowe      zakres      Dane wyjściowe				
2	$x_0$ [m] =	1,00	[0; 3,6]	$v$ [m/s] = 0,27
3	$y_0$ [m] =	0,00	[-0,6; +0,6]	
4	$x_0$ [m] =	1,70	[0,1; 1,85]	
5	$Q$ [ $\text{m}^3/\text{h}$ ] =	1400	[1400; 1800]	
6	$\alpha$ [°] =	45	[30°; 60°]	
7				
8	$x_N$ [m] =	-0,49		
9	$y_N$ [m] =	0,00		
10	$x_N$ [m] =	1,91		
11	$v_{\text{max}}$ [m/s] =	0,78		
12	$R$ [m] =	0,483		
13	$r_{(1)}$ [m] =	0,863		
14	$r_{(2)}$ [m] =	0,863		
15	$r_{(3)}$ [m] =	0,322		
16	$r_{(4)}$ [m] =	0,322		
17	$v_{(1)}$ [m/s] =	0,000		
18	$v_{(2)}$ [m/s] =	0,000		
19	$v_{(3)}$ [m/s] =	0,135		
20	$v_{(4)}$ [m/s] =	0,135		
21	$v$ [m/s] =	0,271		
22				
23				

Rys. 2.118 Fragment zdjęcia ekranu przedstawiający wzór tabeli programu obliczeniowego 'Calculator4G'

Na wykresie (rys.2.119) przedstawiono rozkład wartości przewidywanych, obliczonych na podstawie równania wyprowadzonego z modelu oraz otrzymanych doświadczalnie wartości zmiennych w wyniku przeprowadzonych badań (naniesiono je w postaci punktów). Metoda graficzna w sposób obrazowy ilustruje zgodność wartości przewidywanych z zaobserwowanymi. Rozrzut punktów odpowiada wartości współczynnika korelacji  $R^2 = 0,87$ .



Rys. 2.119 Diagram korelacyjny prędkości oszacowanych w oparciu o model matematyczny względem prędkości zmierzonych ( $r = 0,935$ )

## 7. NIEPEWNOŚĆ POMIARÓW

Pełna informacja o wyniku pomiaru danej wielkości obejmować musi poza uzyskaną wartością, również ocenę poprawności otrzymanego wyniku. Wyniki pomiarów obarczone są błędami grubymi (tzw. przeoczeniami), systematycznymi i przypadkowymi [84, 85, 86, 87, 88]. Wyniki zawierające błędy grube, w trakcie wstępnych analiz zostały eliminowane z dalszych rozważań, a w miarę możliwości pomiar był powtarzany. Błędy systematyczne (związane z niedokładnością używanych w czasie pomiarów przyrządów pomiarowych) są pomijalne i małe w porównaniu do błędów przypadkowych, co przedstawiono w *tab.2.2*.

Tab.2.2 Błędy wynikające z niedokładności przyrządów pomiarowych oraz błędy proste wielkości mierzonych

L.P.	WIELKOŚĆ MIERZONA	ZASTOSOWANY PRZYRZĄD POMIAROWY	ZAKRES POMIAROWY	ŚREDNIA WARTOŚĆ WIELKOŚCI MIERZONEJ	DOKŁADNOŚĆ POMIARU
1	2	3	4	5	6
1	Prędkość powietrza w poszczególnych punktach siatki pomiarowej	Miernik TESTO 400 + 8xsonda do pomiaru, m.in. w zakresie niskich prędkości przepływu powietrza, typu TESTO 0635.1049	0 ÷ 10 m/s	0,26 m/s	± 0,01m/s ± 5%wartości mierzonej
2	Temperatura powietrza w poszczególnych punktach siatki pomiarowej	Miernik TESTO 400 + 8xsonda do pomiaru, m.in. temperatur powietrza, typu TESTO 0635.1049	-20 ÷ +70 <sup>0</sup> C	+22,8 <sup>0</sup> C	± 0,2 <sup>0</sup> C
3	Temperatura powietrza nawiewanego	Regulator sterujący typu RWX 62.7034 + kanałowy czujnik temperatury QAM22	0 ÷ +50 <sup>0</sup> C	+22,3 <sup>0</sup> C	± 0,2 <sup>0</sup> C
	Temperatura powietrza wywiewanego	Regulator sterujący typu RWX 62.7034 + kanałowy czujnik temperatury QAM22	0 ÷ +50 <sup>0</sup> C	+23,5 <sup>0</sup> C	± 0,2 <sup>0</sup> C
5	Różnica ciśnień na kryzie pomiarowej (część nawiewna)	Miernik TESTO 400 + sonda do pomiaru ciśnienia różnicowego, typu TESTO 0638.1445	0 ÷ 2 hPa	0,27 hPa	± 0,01 hPa
6	Różnica ciśnień na kryzie pomiarowej (część wywiewna)	Miernik TESTO 400 + sonda do pomiaru ciśnienia różnicowego, typu TESTO 0638.1445	0 ÷ 2 hPa	0,18 hPa	± 0,01 hPa
6	Spadek ciśnienia na nawiewniku	Miernik TESTO 400 + sonda do pomiaru ciśnienia różnicowego, typu TESTO 0638.1445	0 ÷ 2 hPa	0,21 hPa	± 0,01 hPa
7	Odległości w siatce pomiarowej	Metrówka budowlana	0 ÷ 5 m	0,210	± 0,001m

## 7.1 RACHUNEK BŁĘDÓW

W celu oszacowania dokładności pomiarów prostych określono średni błąd kwadratowy średniej arytmetycznej, będący w istocie empiryczną wartością odchylenia standardowego rozkładu normalnego Gaussa. Wskaźnik ten w sposób najlepszy określa dokładność wyznaczenia wartości średniej arytmetycznej  $\bar{x}$ . Poniżej przedstawiono reguły i wzory, według których wyliczono wartości błędów prostych w pomiarach bezpośrednich. Kolejno określano:

7.1.1 Średnia arytmetyczna  $\bar{x}$  serii pomiarów (najlepsze przybliżenie wartości mierzonej)

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.22)$$

7.1.2 Błąd bezwzględny  $\delta x_i$

$$\delta x_i = x_i - \bar{x} \quad (2.23)$$

7.1.3 Błąd względny  $\delta x^w$

$$\delta x_i^w = \frac{\delta x_i}{\bar{x}} \cdot 100\% \quad (2.24)$$

7.1.4 Błąd średni  $\Delta \bar{x}$  (odchylenie średnie)

$$\Delta \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{n} \quad (2.25)$$

7.1.5 Średni błąd kwadratowy  $S$  (odchylenie standardowe)

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2.26)$$

7.1.6 Średni błąd kwadratowy średniej arytmetycznej  $S(x)$

$$S(x) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n-1)}} \quad (2.27)$$

7.1.7 Ostatecznie wynik rzeczywistej wartości mierzonej wynosi:

$$t = \bar{x} \pm 3S(x) \quad (2.28)$$

7.1.8 Średni błąd kwadratowy wielkości obliczonych

W *tab.2.3* podano średnie kwadratowe błędy wielkości obliczonych przy opracowywaniu wyników pomiarów. Błędy złożone dla wartości obliczonych wyznaczano korzystając ze wzorów dla obliczeń pochodnych występujących w odpowiadających im zależnościach. Średni

błąd cząstkowy poszczególnych wielkości mierzonych, został przyjęty w oparciu o dane z *tab. 2.2*.

Aby wyznaczyć niepewność dotyczącą wyznaczenia prędkości strugi powietrza w dowolnym punkcie siatki pomiarowej, posłużono się złożoną niepewnością standardową oceny wielkości 'y'  $u_y$ . Takie postępowanie słuszne jest w przypadku występowania wielkości wejściowych nieskorelowanych [85, 86].

$$u_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial x_i}\right)^2 \cdot (\bar{s}_i)^2} \quad (2.33)$$

gdzie:

$\frac{\partial g}{\partial x_i}$  - pochodne cząstkowe funkcji g względem poszczególnych zmiennych  $x_i$

$n$  – liczba zmiennych

$\bar{s}_i$  - niepewności średnie skończone

Tab.2.3 Błędy złożone wielkości mierzonych

L.P.	WIELKOŚĆ MIERZONA	ZASTOSOWANA FORMUŁA OBLICZENIOWA	BŁĄD ŚREDNI KWADRATOWY	
			BEZWZGLĘDNY	WZGLĘDNY
1	2	3	5	6
1	Strumień powietrza nawiewanego $V_n=1400$ $m^3/h$	Zgodnie z PN-ISO 5221	$\pm 17,9 m^3/h$	1,28 %
2	Strumień powietrza wywiewanego $V_n=1120$ $m^3/h$	Zgodnie z PN-ISO 5221	$\pm 16,0 m^3/h$	1,43 %
3	Maksymalna prędkość powietrza $v_{max}$ strug cząstkowych	(2.8)	$\pm 0,05 m/s$	8,32 %
4	Prędkość powietrza $v^A$ w dowolnym punkcie A siatki pomiarowej	(2.21)	$\pm 0,03 m/s$	12,58 %

## 8. PODSUMOWANIE WYNIKÓW BADAŃ

W oparciu o wnikliwe studia literaturowe, przeprowadzone badania oraz szczegółowe analizy tych badań można sformułować następujące wnioski:

1. W pracy przeanalizowano zasadnicze układy organizacji wymiany powietrza najczęściej stosowane w salach operacyjnych i zabiegowych szpitali, pod kątem rozplywów czystego powietrza nawiewanego i wyboru rozwiązania najlepszego.
2. Przytoczono i przedyskutowano wymagania, dotyczące kształtowania mikroklimatu pomieszczeń szpitalnych w różnych krajach (stan wiedzy na rok 2006) i przybliżono światowe trendy rozwoju w szpitalnej technice klimatyzacyjnej.
3. W wyniku badań i ich analiz, podważono celowość stosowania stropu nawiewnego o wypływie laminarnym (najczęściej obecnie stosowanego w Polsce rozwiązania), przy dopuszczalnych i zalecanych minimalnych strumieniach powietrza klimatyzującego, tj.  $\psi = 12\text{h}^{-1}$ .
4. Stwierdzono, że umiejscowiony nad polem operacyjnym laminarny strop nawiewny, przy zbyt niskich prędkościach wypływu powietrza (wynikających z przyjmowanych minimalnych krotności wymian powietrza w salach), nie zapewnia wymaganej sterylności w obszarze krytycznym. W przebadanych salach operacyjnych struga powietrza nawiewanego, w niewielkim tylko stopniu, skutecznie omywała obszar ochronny.
5. Pożądany efekt sterylności obszaru z zastosowaniem sufitowych nawiewników laminarnych, uzyskać można dopiero poprzez znaczne zwiększenie prędkości powietrza nawiewanego. Zatem, przy dużo większych strumieniach powietrza, co jednakże pociąga za sobą znaczny wzrost kosztów eksploatacyjnych. Często ze względu na zwiększoną turbulencję strugi oraz dużą indukcję otaczającego powietrza, rozwiązanie to okazuje się także nieskuteczne.
6. Porównano nawiewniki stosowane w klimatyzacji sal operacyjnych i zabiegowych pod kątem uzyskiwanego charakteru strugi powietrza nawiewanego, laminarnego lub turbulentnego (chodziło o dobre i złe laminaryzatory).
7. Zaprojektowano i wykonano pojedynczy wielkogabarytowy nawiewnik skośny, autorskiej konstrukcji, o kierunkowym wypływie powietrza nawiewanego i zaproponowano nazwę tego nawiewnika, tj. **SLANtinG**



8. Należy podkreślić, iż przedstawienie dokładnych wyników badań prędkości i temperatur powietrza, (zostały przeprowadzone aż w ośmiu płaszczyznach pomiarowych równocześnie), możliwe było wyłącznie dzięki uzyskaniu środków z KBN-u na zakup specjalistycznych sond termo-anemometrycznych do pomiarów w zakresie niskich prędkości, (*uzyskano grant promotorski Nr 4T07E 029 27*) oraz dzięki pomocy firmy PWPO-T PROMONT ze Świebodzic.
9. Badany prototyp nawiewnika skośnego, o odpowiednio ukierunkowanym wypływie powietrza, stwarza właściwy kształt jądra strumienia powietrza nawiewanego i umożliwia doprowadzenie czystego powietrza w strefę obszaru krytycznego. Zmniejszeniu uległa turbulencja strugi nawiewnej, w wyniku przesunięcia „efektu rozcieńczenia” w stronę „wyporu”, m.in. za przyczyną zastosowania filtrów absolutnych (stanowiących rodzaj dobrego laminaryzatora), jako faktycznej płaszczyzny nawiewu.
10. Wyznaczono najkorzystniejsze umiejscowienie nawiewnika, tj.: odległość, wysokość zawieszenia i kąt pochylenia płaszczyzny nawiewnej względem stołu operacyjnego.
11. Z zastosowaniem matematycznych narzędzi statystycznych, utworzono model teoretyczny badanego nawiewnika, a w szczególności wyprowadzono formułę na obliczenie przewidywanej prędkości ruchu powietrza w dowolnym punkcie obszaru w jakim prowadzono badania. Prędkość ta zależy od: strumienia powietrza wypływającego z nawiewnika i odległości od nawiewnika określonej dwoma parametrami ( $z$ ,  $R$ ). Otrzymana formuła może być przydatna do celów projektowych (tj. dla doboru nawiewnika o odpowiednim strumieniu powietrza klimatyzującego, jego odległości, wysokości i kącie pochylenia względem stołu operacyjnego).
12. W dostępnym piśmiennictwie nie znaleziono formuł opisujących strumienie powietrza wypływające z dużych otworów kwadratowych (a za taki, w dużym uproszczeniu, należy uznać badany nawiewnik), złożone z szeregu strug cząstkowych. Otrzymana zależność dobrze opisuje działanie takiego nawiewnika.
13. Przeprowadzone badania i liczne analizy wskazują na osiągnięcie postawionego celu pracy. Zaproponowany system z zastosowaniem autorskiego nawiewnika **SLANtinG** wydaje się być dobrym rozwiązaniem dla stwarzania pożądanego mikroklimatu w rozpatrywanych obiektach.
14. Przebadany prototyp wielkogabarytowego pojedynczego nawiewnika skośnego o kierunkowym wypływie powietrza nawiewanego, autorskiej konstrukcji, z uwagi na

potwierdzoną badaniami dużą efektywność działania w obszarze krytycznym oraz wymaganą niewielką przestrzeń podstropową (do zamontowania), można zaproponować do szerokiego stosowania w obiektach Służby Zdrowia, zwłaszcza modernizowanych.

## 9. WNIOSEK KOŃCOWY

Przedstawiony, przebadany i opisany w pracy doktorskiej prototypowy nawiewnik skośny, powoduje pożądaną, mało turbulentny ruch powietrza w obrębie pola operacyjnego. Spełnia zatem bardzo ważne zadanie dobrego omywania sterylnym powietrzem obszaru krytycznego, tj. obszaru stołu operacyjnego w salach operacyjnych. Zadawalające wyniki uzyskano już przy strumieniu powietrza klimatyzującego  $V=1400 \text{ m}^3/\text{h}$ , co przy dopuszczalnych minimalnych wymiarach sal w kraju wynoszących obecnie  $35 \text{ m}^2$  i wysokości  $H = 3,0 \text{ m}$  [106] stwarza wymianę powietrza  $13,3 \text{ h}^{-1}$ .

Wyniki badań upoważniają do stwierdzenia, że zastosowanie proponowanego w pracy nawiewnika skośnego może dać bardzo korzystne efekty (znacznie lepsze niż przy stosowanych obecnie nawiewnikach sufitowych). Uwidoczni się to szczególnie na oddziałach operacyjnych o niezbędnej wysokiej aseptyce, (m.in. na ortopedycznym). Intencją jest przyczynienie się rozwiązania do ograniczenia liczby pooperacyjnych infekcji szpitalnych, a w konsekwencji skrócenie czasookresu hospitalizacji (a więc obniżenie kosztów leczenia), ale zwłaszcza zmniejszenie liczby zgonów operowanych pacjentów.

## 10. PIŚMIENNICTWO

- [1] LAMONT A.: Joseph Lister - father of modern surgery, *Creation Magazine*, Vol.14, Issue 2, March 1992, ISSN 0819-1530
- [2] PHILIPS G. B., RUNKLE R. S.: *Biomedical applications of laminar flow*, first ed (Cleveland, Ohio: CRC Press, 1973)
- [3] <http://web.ukonline.co.uk/b.gardner/Lister.html>
- [4] HUGHES S.P.F., ANDERSON F.M.: Infection in the operating room, *The Journal of Bone & Joint Surgery (Br)*, Vol. 81-B, No. 5, September 1999
- [5] <http://www.chemistryexplained.com/Kr-Ma/Lister-Joseph.html>
- [6] *Kronika medycyny, Praca zbiorowa, KRONIKA 1994*, ISBN: 83-86079-01-0
- [7] <http://www.thegarret.org.uk/tour.htm>
- [8] [www.theglasgowstory.com/images/TGSJ00017\\_m.jpg](http://www.theglasgowstory.com/images/TGSJ00017_m.jpg)
- [9] [http://pl.wikipedia.org/wiki/Florence\\_Nightingale](http://pl.wikipedia.org/wiki/Florence_Nightingale)
- [10] NIGHTINGALE F.: *Notes on Nursing, What it is and what it is not*, (Edinburgh: Churchill Livingstone, 1980)
- [11] BULANDA M.: Zakażenia pod kontrolą, Wywiad z prezesem PTZS, *Ogólnopolski Przegląd Medyczny – Magazyn lekarzy i menedżerów Służby Zdrowia*, ELAMED 6/2006
- [12] MILLS F.: Indoor air quality standards in hospitals, *Hospital engineering & facilities management, Infection Control* 2003
- [13] *Lecture At Swedish Institute for Infectious Disease Control*, 1995 Stockholm
- [14] DICKENS A.: A New report on the Cost to the Health Sector of Hospital-acquired Infections, *The Press Conference of the Royal Society of Medicine*, January 2000
- [15] KULIK A.: Zaraza, *Wprost* nr 37, 1996
- [16] DORCHIES F.: Nosocomial Infections and Air Filtration In Operating Theatre Suites – Application of French Standards NFS90-351: *Technology & Services* 2003
- [17] REISS J.: Zakażenia szpitalne – ryzyko, możliwości, ograniczenia, *Medycyna* 2000, tom 51/52, 1995
- [18] EVANS R. P.: Laminar air flow in the operating room, *American Academy of Orthopaedic Surgeons*, June 2006, Volume 54, No3
- [19] FRIBERG B.: Ultraclean laminar airflow ORs – operating rooms, *AORN Journal*, 1998 Apr, 67
- [20] *Wound Infection after surgery – hospital hygiene*, *Lakartidningen*, 1985 Sweden
- [21] BENGSTON S.: BLOMGREN G., KNUTSON K., WIGREN A., LIDGREN L.: Hematogenous infection after knee arthroplasty, *Acta Orthopaedica Scandinavica* 58, 1987
- [22] LIDWELL O.M., LOWBURY E.J.L.: Effect of ultraclean air in operating rooms on deep sepsis in the joint after total hip or knee replacement: A randomized study, *British Medical Journal*, Vol285, July 1982
- [23] SALVATI E.A., ROBINSON R.P., ZENO S.M., KOSLIN B.D., BRAUSE B.D., WILSON P.D.: Infection after 3179 total hip and total knee replacement performed with and without a horizontal unidirectional filtered air – flow system, *Journal Joint Surgery* 64 (1982)
- [24] WHYTE W., LIDWELL O.M., LOWBURY E.J.L., BLOWERS R.: Suggested bacteriological standards for air in ultraclean operating theatres, *Journal of hospital Infection* Vol.42, 1983
- [25] LIDWELL O.M.: Clean air at operation and subsequent sepsis in the joint. *Clin. Orthop.* 1986;211
- [26] LIDWELL O.M., LOWBURY E.J.L.: Airborne contamination of wounds in joint replacement operations: the relationship to sepsis rates, *Journal of Hospital Infection* Vol.4, 1983
- [27] GRÜN L.: Maßnahmen zu einer Verminderung des areogenen Infektionsrisikos im Krankenhaus, *Hyg. Med.* 8, 1983
- [28] KAMEEL R., KHALIL E.E.: The prediction of airflow regimes in surgical operating theatres: A comparison of different turbulence models, *Artykuł konferencyjny 41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno-Nevada*, Jan 2003
- [29] McQUARRIE D. G., GLOGER J. L., OLSON M. M.: Laminar airflow systems: Issues surrounding their effectiveness, *AORN Journal* 1990
- [30] POROWSKI M., SZCZECHOWIAK E.: *Klimatyzacja Pomieszczeń Czystych*, TERMEDIA, Poznań 1999
- [31] PRZYDRÓŻNY ST.: *Problemy klimatyzacji i wentylacji szpitali*, COW 1980, 11-12
- [32] BESLER G.J., BESLER M., SPŁAWSKI R.: *Mikroklimat a oszczędności w lecznictwie*, Konferencja SanMed, Łódź 2002
- [33] CHARKOWSKA A.: *Klimatyzacja sal operacyjnych w szpitalach (cz.1)*, *Chłodnictwo & Klimatyzacja*, 1-2/2006
- [34] PRZYDRÓŻNY St., FERENCOWICZ J., BEDNARSKI J., KORBUT L., PRZYDRÓŻNY E.: *Klimatyzacja bloków (zespołów operacyjnych) I etap*, Raport nr R-18/75, Wrocław, marzec 1975

- [35] HALUPCZOK J.: Wentylacja pomieszczeń czystych, cz.I, COW nr6/1997
- [36] FANGER P.O.: Komfort cieplny, Arkady, Warszawa 1974
- [37] CHARKOWSKA A.: Nowoczesne systemy klimatyzacji w Obiektach Służby Zdrowia, IPPU MASTA 2000
- [38] KLINKE T.: Komfort cieplny w salach operacyjnych, COW 7/1973
- [39] SPŁAWSKI R., REDER S.: Badania strumieni powietrza nawiewanego w wybranych salach operacyjnych szpitali, Artykuł konferencyjny XI Międzynarodowej Konferencji Naukowej: „Air Conditioning, Air protection and District Heating 2005” Szklarska Poręba
- [40] KRZYSZTOFIK B., KAMIŃSKA H., KARASIŃSKA B., SARAMA H., SOBÓTKA J.: Klimatyzacja sal operacyjnych, COW 1991/4
- [40a] ROSJO K.: Ventilation Systems In the future operating theatres AET – ARBEIDSMILJO OG ENERGITEKNIKK A/S, Strommen, 37<sup>th</sup> R<sup>3</sup> Nordic Contamination Control Symposium, Tampere 2006
- [41] BELAIR L.: Reducing Operating Room Infections from the Top Down, Phoenix, July 2006, <http://www.csemag.com/article/CA6352818.html?industryid=23639>
- [42] Installations for Ventilation and Air-conditioning, Krankenhaushygiene, Hygiene in Hospital and Practice, mhp-Vrlag, Wiesbaden 2005
- [43] BRUNNER A.: Neue Krankenhausrichtlinien in der Schweiz und in Deutschland, [www.bht.ch/portrait/041102-GIT\\_Spital\\_2167.pdf](http://www.bht.ch/portrait/041102-GIT_Spital_2167.pdf)
- [44] CHARKOWSKA A.: Czystość mikrobiologiczna i pyłowa środowiska szpitalnego (cz.II), CHŁODNICTWO & Klimatyzacja 1-2/2006
- [45] PIĄTEK K.: Złoty eskulap dla Cadolto, Menedżer Zdrowia, Termedia, 2/2006
- [46] MEMARZADEH F., MANNING A.: Comparison of operating room ventilation systems in the protection of the surgical site, ASHRAE Transactions, Vol.108, 2002
- [47] MEMARZADEH F., JIANG Z.: Effect of Operating Room Geometry and Ventilation System Parameter Variations on the Protection of the Surgical Site, ASHRAE Transactions, Vol.108, 2004
- [48] MEMARZADEH F., MANNING A.: Reducing risks of surgery, ASHRAE Journal, February 2003
- [49] ASHRAE Handbook Applications, Chapter 7 – Health Care Facilities, Atlanta 2003
- [50] RECKNAGEL H., Sprenger E., Schramek E.: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik 2005/06, Einschließlich Warmwasser- und Kältetechnik (Gebundene Ausgabe), Oldenbourg Industrieverlag 2004
- [51] HALUPCZOK J.: Stabilność przepływu powietrza w pomieszczeniach czystych, COW nr3/1999.
- [52] FITZNER K.: Verteilung von Luftverunreinigungen un Temperaturen im Raum, <http://www.tu-berlin.de>, 2003
- [53] ASHRAE Handbook Applications, Chapter 15 – Clean Spaces, Atlanta2003
- [54] GIRDWOYŃ A.: Wentylacja waporowa w aspektach energetycznym i komfortu cieplnego, Artykuł konferencyjny: „Problemy Inżynierii Środowiska u progu nowego tysiąclecia”, Wrocław-Szklarska Poręba 2000
- [55] FITZNER K.: Gleichmäßige Luftabsaugung aus großflächigen Reinräumen mit Treibdüsen, VDI Berichte nr.783, 1989
- [56] FITZNER K.: Zuluftdecken für Operationsräume, HLH 1990
- [57] POROWSKI M., SZCZECHOWIAK E.: Wybrane wymagania klimatyzacji sal operacyjnych w szpitalach, Ogrzewnictwo praktyczne nr 3/1999
- [58] PRZYDRÓŻNY ST., FERENCOWICZ J.: Klimatyzacja, Skrypt Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1989
- [59] POROWSKI M., SZCZECHOWIAK E.: Ocena mikrobiologiczna układów nawiewnych w salach operacyjnych, Ogrzewnictwo praktyczne nr 4/1999
- [60] RECKNAGEL H, SPRINGER E., HOFMANN W., SCHRAMEK E.: Poradnik - Ogrzewanie i Klimatyzacja, EWFE –Wydanie 1, Gdańsk 1994
- [61] SCHEER F. A.: Eifflu der Turbulenz einer Verdrängungsströmung in Operationsräumen auf Transport und Sedimentation von Mikroorganismen, Dissertation TU Berlin (D83) 1998
- [62] SCHMIDT P.: Zur Luftführung in Operationsräumen, Heizung Luftung Haus Technik 38(3), 1987
- [63] CHARKOWSKA A., Klimatyzacja sal operacyjnych w szpitalach (cz.II), Chłodnictwo & Klimatyzacja, 3/2006
- [64] SEIPP H. M., SCHROT A., BESCH H.: Operative Reinraumtechnik, Hyg. Med. 1998
- [65] MAKOWIECKI J.: Nawiewy laminarne do sal operacyjnych w szpitalach, Technika Chłodnicza i Klimatyzacyjna 3/2001)
- [66] HALUPCZOK J.: Jakościowe porównanie systemów nawiewania powietrza w pomieszczeniach czystych, COW nr 12/2002

- [67] HARTUNG C., KUGLER J.: Perturbations Affecting the Performance of Laminar Flow in Operating Theatres, Materiały konferencyjne 15th IFHE CONGRESS, Hannover, 1998 Germany
- [68] Prywatna korespondencja z prof. Klaus'em Fitnzerem, luty 2006
- [69] The cleanroom monitor - Issue 50, The Scottish Society for Contamination Control, June 2004
- [70] The cleanroom monitor - Issue 47, The Scottish Society for Contamination Control, August 2003
- [71] The cleanroom monitor - Issue 49, The Scottish Society for Contamination Control, March 2004
- [72] POROWSKI M.: Kryterium energetyczne wyboru układu klimatyzacyjnego dla sal operacyjnych wysokoaseptycznych, CHŁODNICTWO&KLIMATYZACJA, 1-2/2004
- [73] STEINEL M.: Nowe Energooszczędne rozwiązania – Klimatyzacja sal operacyjnych CHŁODNICTWO&Klimatyzacja 8/2002
- [74] LEWIS J.R.: Operating room air distribution effectiveness, ASHRAE Transaction, 1993
- [75] PRZYDRÓŻNY St., BEDNARSKI J., KORBUT L., WIECZOREK M., KAJL St., MAZURKIEWICZ W., RUSZEL F., SZYBEJKO St.: Systemy klimatyzacji bloków operacyjnych, II etap, Raport nr R-7/76, Wrocław, marzec 1976
- [76] PRZYDRÓŻNY St., PEŁECH A., KALINOWSKI B.: Systemy klimatyzacji bloków operacyjnych, III etap, Raport serii SPR nr 51/79, Wrocław 1979
- [77] PRZYDRÓŻNY St., BEDNARSKI J., GRZEGORCZYK A., KALINOWSKI B., MISŃSKI J., PRZYDRÓŻNY E.: Instalacje klimatyzacyjno-wentylacyjne szpitali, II etap, Raport serii SPR nr 22/80, Wrocław 1980
- [78] BUGAJ A. H., PRZYDRÓŻNY St.: New concept in clean room techniques, Ventilation '85, H. D. Goodfellow, 1986
- [79] FITZNER K.: Particle movement In Clean rooms with Laminar flow, 9th International Symposium on Contamination Control, Los Angeles, California, USA Sept.26-30, 1988
- [80] MALICKI M.: Wentylacja i klimatyzacja, PWN, Warszawa 1974
- [81] BENSTEN J.: Krankenhaus Klimatisierung, Nordisk Ventilator Co., May 1967
- [82] DUCEL G., WILDENBERG van den P.: Vergleichende Studie mit verschiedenen Luftführungssystemen, Schweiz, Januar 1996
- [83] PRZYDRÓŻNY ST., FERENCOWICZ J.: Wentylacja, Skrypt Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1989
- [84] STRZAŁKOWSKI A., ŚLIŻYŃSKI A.: Matematyczne metody opracowywania wyników pomiarów, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1978
- [85] KOTULSKI Zb., SZCZEPIŃSKI W.: Rachunek Błędów dla inżynierów, WNT, Warszawa 2004
- [86] POPRAWSKI R., SALEJDA W.: Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki – cz.1, Zasady opracowania wyników pomiarów, Skrypt PW, Wrocław 2002
- [87] RUMSZYCKI L.Z.: Matematyczne opracowanie wyników eksperymentu, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 1975
- [88] KOŁODZIEJCZYK L., RUBIK M., MAŃKOWSKI S.: Pomiary w inżynierii sanitarnej, Arkady, Warszawa 1974

### **Normy, wytyczne i katalogi firmowe**

- [89] 98 NF S 90-351: Etablissement de santé: salles propres et environnements maîtrisés et apparentés, 2003
- [90] 99 VDI 2083 Blatt 5, Reinraumtechnik – Thermische Behaglichkeit, 1996: 02
- [100] Directive SICC 99-3: Installations de chauffage et de ventilation dans les hôpitaux (planification, construction, exploitation), May 2003 r.
- [101] Guidelines (draft): Designing and Operating Heating, Ventilation and Air-Conditioning (HVAC) in Hospitals, Deutsche Gesellschaft für Krankenhaushygiene, Hyg. Med. 27, 2002
- [102] SWKI - Richtlinie 99-3: Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage in Spitalbauten, 2003
- [103] VDI 2167-1: Technische Gebäudeausrüstung von Krankenhäusern - Heizungs- und Raumlufttechnik/ 2004
- [104] HBN 26 - Operating department, Facilities for surgical procedures: Volume 1, 1991, NHS Estates
- [105] Guidelines for Design and Construction of Health Care Facilities, American Institute of Architects/ Facility Guidelines Institute, 2006
- [106] Rozporządzenia Ministra Zdrowia z dnia 22 czerwca 2005 r. w sprawie wymagań, jakim powinny odpowiadać pod względem fachowym i sanitarnym pomieszczenia i urządzenia zakładu opieki zdrowotnej, Dz. U. Nr 116, poz. 985, 2005
- [107] Weiss Klimatechnik GmbH, Geräte- und Anlagenbau – materiały reklamowe 2005
- [108] HTM 2025 - Health Technical Memorandum 2025, Ventilation in healthcare premises, Design consideration, 1999, NHS Estates

- [109] Praca Zbiorowa, Wytyczne projektowania szpitali ogólnych – Instalacje sanitarne, zeszyt 5, Wentylacja i Klimatyzacja, Biuro Studiów i Projektów Służby Zdrowia, Warszawa 1984
- [110] Proposed New Standard 170p – Second Public Review Draft, Ventilation of Health Care Facilities, BSR/ASHRAE/ASHE, Sep.2006
- [111] ÖNORM H 6020 Lüftungstechnische Anlagen in Krankenanstalten, ONW 1999
- [112] DIN 1946-4, Teil 4, Raumluftechnik, Raumluftechnische Anlagen in Krankenhäusern (VDI-Luftungsregeln), Marz 1999
- [113] ANSI/ASHRE Standard 62.1-2004, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, Inc. Atlanta 2004
- [114] US-Federal Standard 209D, Airborne Particulate Cleanliness Classes In Cleanrooms and Clean Zones, September 1988
- [115] US-Federal Standard 209E, Airborne Particulate Cleanliness Classes In Cleanrooms and Clean Zones, September 1992
- [116] ISO 14644-1: Cleanrooms and associated controlled environments, part 1 Classification of air cleanliness
- [117] PN EN ISO 14644-1: Pomieszczenia czyste i związane z nimi środowiska kontrolowane, część 1: Klasyfikacja czystości powietrza, 2004
- [118] BS 5295: Environmental cleanliness classes in enclosed spaces, 1989
- [119] JIS B 9920: Title Classification of air cleanliness for cleanrooms, 2002
- [120] AS 1386: Cleanrooms and clean Work station, 1989
- [121] NF X 44-101: Définition et classification de la propreté particulaire de l'air et d'autres gaz, 1981
- [122] FESTO AG & Co. – Cleanroom technology Handbook, Singapore
- [123] Clean Room Technique, NICKEL Air Conditioning and Ventilation Brochure, 1993
- [124] LUWA Cleanroom Technology, Brochure 2005
- [125] WEISS Klimatechnik Polska, Karta katalogowa – Nowa generacja stropów z przepływem laminarnym dla sal operacyjnych
- [126] Karty katalogowe firmy TROX Technik
- [127] Karta katalogowa firmy ClimaTech/nawiewnik wirowy
- [128] Karta katalogowe firmy KLIMOR- Gdynia
- [129] Karta katalogowe firmy GEA Klimatyzacja
- [130] Karta katalogowa firmy ClimaTech/nawiewnik skośny
- [131] Karta katalogowa firmy KLIMOR/nawienik NSL
- [132] Karta katalogowa firmy ClimaTech/strop nawiewny OP
- [133] Karty katalogowe firmy AW KLIMA
- [134] Karty katalogowe firmy KRANTZ
- [135] Zdjęcia udostępnione przez firmę CLIMA TECH Sp z o. o. Polska
- [136] Health Pro Pty Ltd – karta katalogowa, UCV Ventilation Modules – FOCUS 3000 o wym 3,8x3,8 z went recyrkulacja i kurtyna; <http://www.healthpro.com.au>
- [137] Katalog firmy Precision AirProducts Co., Brochure-Lami-Gard™ System
- [138] Karta katalogowa MEDICLEAN WEISS Klimatechnik GmbH, Nowa generacja stropów z przepływem laminarnym dla sal operacyjnych. Wersje z powietrzem świeżym typu FFA.3 oraz z recyrkulacją typu ULA.3
- [139] Karty katalogowe firmy ADMECO
- [140] Brochure, Innovative developments for Sterile Air System in Hospitals, OPTIMA CG, *McLeod RUSSEL*
- [141] PN-87/B-02151/02, Akustyka budowlana, Ochrona przed hałasem pomieszczeń w budynkach. Dopuszczalne wartości poziomu dźwięku w pomieszczeniach
- [142] Obwieszczenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dn.4.02.1999r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Gospodarki Przestrzennej i Budownictwa w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, Dz. U. RP nr 15 z dnia 15.02.1999 §153
- [143] Katalog Sprzętu Medycznego firmy KENDROMED, 2003
- [144] PN-EN ISO 5167-2: 2005, Pomiar strumienia płynu za pomocą zwężek pomiarowych wbudowanych w całkowicie wypełnione rurociągi o przekroju kołowym -część 2: Kryzy