

Kryteria wyboru układu klimatyzacyjnego dla bloku operacyjnego

Mieczysław Porowski
Edward Szczechowiak

Instytut Inżynierii Środowiska
Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 3A
60-965 Poznań

1. Wprowadzenie

Na etapie projektowania układu klimatyzacyjnego dla bloku operacyjnego w szpitalach występuje – w odróżnieniu od układów klimatyzacyjnych innych pomieszczeń – szereg specyficznych uwarunkowań. Specyfika ta wynika tutaj ze szczególnych wymagań dla układów klimatyzacyjnych bloków operacyjnych, w szczególności utrzymania odpowiedniej czystości, parametrów termodynamicznych powietrza, stabilności pól prędkości, układu ciśnień i niezawodności działania.

Struktury układów klimatyzacyjnych dla sal operacyjnych są zatem bardziej złożone i obejmują dodatkowo wielostopniowe układy filtracji, regulatory przepływu, podział na strefy regulacji parametrów, bardziej zaawansowany technologicznie monitoring i układy sterowania, a także dodatkowe elementy instalacyjne – klapy rewizyjne, przepustnice o podwyższonej szczelności, tłumiki w wykonaniu higienicznym.

Wybór układu klimatyzacyjnego dla bloku operacyjnego wymaga zatem od projektanta identyfikacji i rozważenia szeregu kryteriów, w szczególności klasy czystości, wielkości obciążeń, jakości regulacji i strategii sterowania, niezawodności, poziomu hałasu, uwarunkowań architektonicznych i konstrukcyjnych oraz kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych. Zagadnienia te są przedmiotem dalszych rozważań.

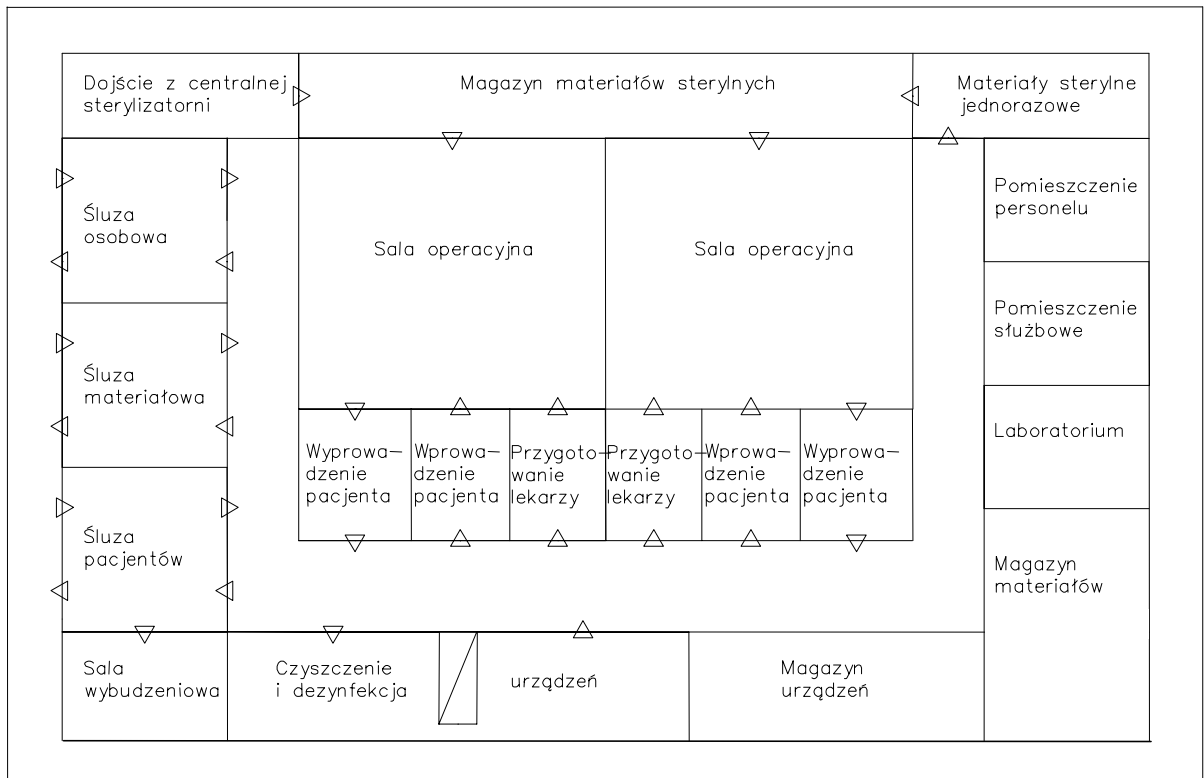
2. Układy funkcjonalne bloków operacyjnych

Punktem wyjścia analizy wyboru układu klimatyzacyjnego dla bloku operacyjnego jest układ funkcjonalny pomieszczeń oraz ich wyposażenie technologiczne. Standardy w zakresie układu funkcjonalnego pomieszczeń obejmują:

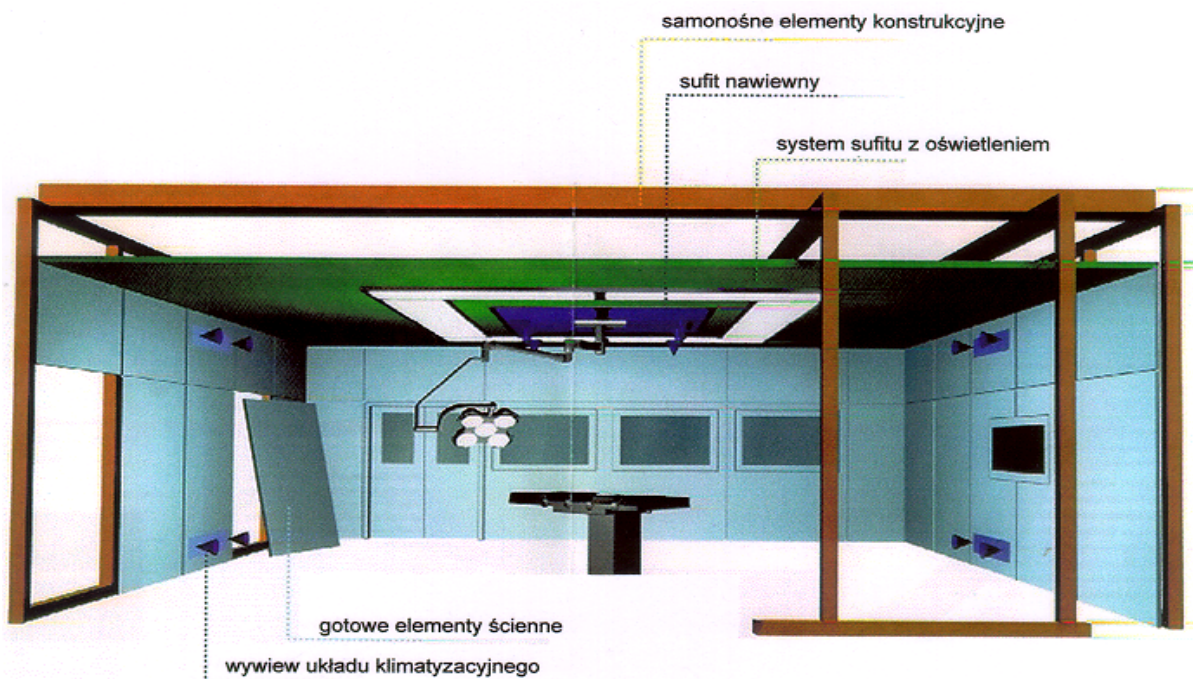
- sale operacyjne z pomieszczeniami bezpośredniego zaplecza,
- sale wybudzeniowe,
- sterylizatornie,
- korytarze czyste, brudne,
- układ śluz.

Bezpośrednio z salami operacyjnymi są funkcjonalnie powiązane pomieszczenia przygotowania pacjenta i pomieszczenia przygotowania lekarzy oraz niekiedy podręczne sterylizatornie. W przypadku małych bloków operacyjnych przy braku sali wybudzeniowej, funkcję tej sali pełnią pomieszczenia przygotowania pacjenta. W takich przypadkach projektuje się na ogół oddzielne pomieszczenia wprowadzania pacjenta i wprowadzenia pacjenta, przy czym pomieszczenie wyprowadzenia pacjenta pełni wówczas funkcję sali wybudzeniowej. Przykładowy układ funkcjonalny pomieszczeń bloku operacyjnego przedstawiono na rys. 1. Również ważny jest sposób konstruowania wnętrza sal operacyjnych

i ich wyposażenia. Aktualne tendencje, to stosowanie specjalizowanych modułów montażowych, zapewniających wyższą jakość sal operacyjnych (rys. 2).



Rys. 1. Układ funkcjonalny pomieszczeń bloku operacyjnego (przykład)



Rys. 2. System modułów do montażu sal operacyjnych

3. Wymagania dla wentylacji i klimatyzacji pomieszczeń bloku operacyjnego

Kryterium nadrzędnym wyboru układu klimatyzacyjnego dla bloku operacyjnego jest spełnienie wymagań normatywnych w zakresie:

- czystości powietrza i udziału powietrza zewnętrznego,
- parametrów termodynamicznych powietrza,
- pola prędkości,
- układu ciśnień,
- poziomu hałasu.

Wymagania w tym zakresie szeroko omówione są w literaturze [3,4,5]. Podstawowe wymagania zestawiono w tablicy 1 dla standardowych pomieszczeń bloku operacyjnego.

Tablica 1. Wymagania dla wentylacji i klimatyzacji pomieszczeń bloku operacyjnego [3,4,5]

| Nazwa pomieszczenia | Klasa czystości ¹⁾ | Minimalna krotkość wymian [1/h] ²⁾ | Temperatura [°C] | Wilgotność względna [%] | Maks. prędkość powietrza [m/s] | Układ ciśnień [%] | Poziom hałasu [dB(A)] |
|--|-------------------------------|---|------------------|-------------------------|---------------------------------|-------------------|-----------------------|
| Sale operacyjne: - wysokoaseptyczne | I | system wporowy | 22 ÷ 25 | 55 | 0,4 ÷ 0,5 | +20 | 30/35 ⁴⁾ |
| - aseptyczne, septyczne | II | 12 ÷ 15 | 22 ÷ 25 | 55 | 0,4 (0,15÷0,2) ³⁾ | +20 | 30/35 |
| - zabiegowo-operacyjne | III | 12 ÷ 15 | 22 ÷ 25 | 40 ÷ 60 | 0,2 | +10 | 30/35 |
| Pomieszczenia przygotowania chorego | II | 12 ÷ 15 | 22 ÷ 25 | 40 ÷ 60 | 0,2 | +15 | 30/35 |
| Pomieszczenia przygotowania lekarzy | II | 10 | 22 ÷ 25 | 40 ÷ 60 | 0,2 | +10 | 35/40 |
| Sale wybudzeniowe | II | 10 | 22 ÷ 25 | 55 | 0,2 | +15 | 30/35 |
| Korytarze czyste | II | 5 | 20 ÷ 25 | 40 ÷ 60 | 0,2 | +5 | 35/40 |
| Korytarze brudne | II | 5 | 20 ÷ 25 | 40 ÷ 60 | 0,2 | -5 | 35/40 |
| Steryliźatornie w zespole operacyjnym | II | 10 | 20 ÷ 25 | 40 ÷ 60 | 0,2 | +10 | 35/40 |

¹⁾ Klasy wg wytycznych polskich: I - 70 JTK/m³, II - 300 JTK/m³, III - 700 JTK/m³; Niemiecka norma DIN 1946, T. 4 ze względów higienicznych i septycznych wyróżnia 2 klasy pomieszczeń szpitalnych:

- I klasa pomieszczeń – wysokie, lub szczególnie wysokie wymagania (10-100 JTK/m³),
- II klasa pomieszczeń – zwykłe wymagania (200-300 JTK/m³).

²⁾ Recyrkulacja na warunkach [6, 7];

³⁾ W strefie przebywania ludzi (personelu);

⁴⁾ Od wentylacji / od wszystkich źródeł hałasu.

4. Kryteria wyboru układu klimatyzacyjnego

Wymagania normatywne dla wentylacji i klimatyzacji pomieszczeń bloku operacyjnego są podstawowym, lecz nie jedynym kryterium wyboru układu klimatyzacyjnego. Analiza zagadnienia pozwala tutaj wyszczególnić następujące, często powiązane ze sobą kryteria:

- funkcja, ilość i klasa czystości sal operacyjnych,
- obciążenia, ilość powietrza, udział powietrza wewnętrznego,
- wielkość i wymiary gabarytowe centrali klimatyzacyjnej i innych urządzeń,
- uwarunkowania architektoniczne,
- zintegrowanie z pozostałym wyposażeniem sali operacyjnej,

- jakość regulacji i strategia sterowania,
- niezawodność działania i dotrzymania parametrów,
- poziom hałasu (głośności),
- zużycie energii, koszty inwestycyjne i eksploatacyjne.

Funkcja i klasa czystości sali operacyjnej determinuje w praktyce rodzaj zastosowanego systemu rozdziału powietrza, ilość powietrza, liczbę stopni i jakość filtracji, wymiary centrali klimatyzacyjnej, jakość obudowy sali operacyjnej. Realizacja funkcji celu możliwa jest pod warunkiem zastosowania odpowiedniego układu obróbki powietrza (w tym filtracji powietrza – tabl. 2) decydującego o jakości powietrza nawiewanego.

Tablica 2. Właściwa i maksymalna dopuszczalna koncentracja zanieczyszczeń pyłowych i bakteriologicznych powietrza na nawiewie do sal operacyjnych przy trzystopniowej filtracji (EU5, EU9 i R lub S) - wg DIN 1946 T. 4

| Klasa filtra III stopnia | Koncentracja cząstek stałych w powietrzu $\geq 0,5 \mu\text{m}/\text{m}^3$ | | Koncentracja zanieczyszczeń mikrobiologicznych w powietrzu [JTK /m ³] | |
|------------------------------|--|-----------|---|-----------|
| | Właściwa | Graniczna | Właściwa | Graniczna |
| Filtr S (EU12-EU13) | 4 000 | 10 000 | 4 | 10 |
| Filtr R ¹⁾ (EU11) | 40 000 | 100 000 | 4 | 10 |
| Filtr R ²⁾ (EU11) | 400 000 | 1 000 000 | 4 | 10 |

¹⁾ penetracja filtra 0,1% wg DIN 1946 Teil 4

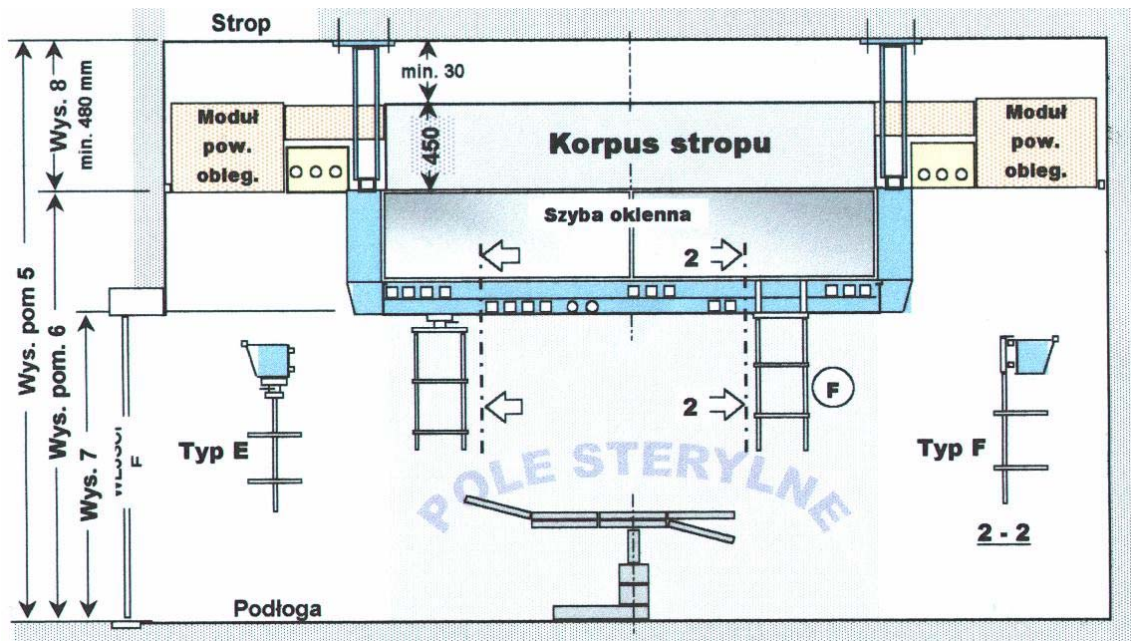
²⁾ penetracja filtra wynosi 2% wg DIN 24 184

Przy założeniu nawiewu powietrza sterylnego, co jest możliwe przy zastosowaniu odpowiedniej klasy filtrów powietrza, o jakości powietrza w strefie pola operacyjnego decyduje głównie rozkład źródeł emisji zanieczyszczeń oraz system rozdziału powietrza. Głównym emitorem zanieczyszczeń w sali operacyjnej jest zespół operacyjny, a ilość emitowanych mikroorganizmów zależy od następujących czynników:

- rodzaju operacji,
- liczby osób w sali operacyjnych,
- aktywności zespołu operacyjnego,
- dyscypliny higienicznej członków zespołu operacyjnego,
- środków zapobiegawczych, w tym odzieży ochronnej zespołu operacyjnego.

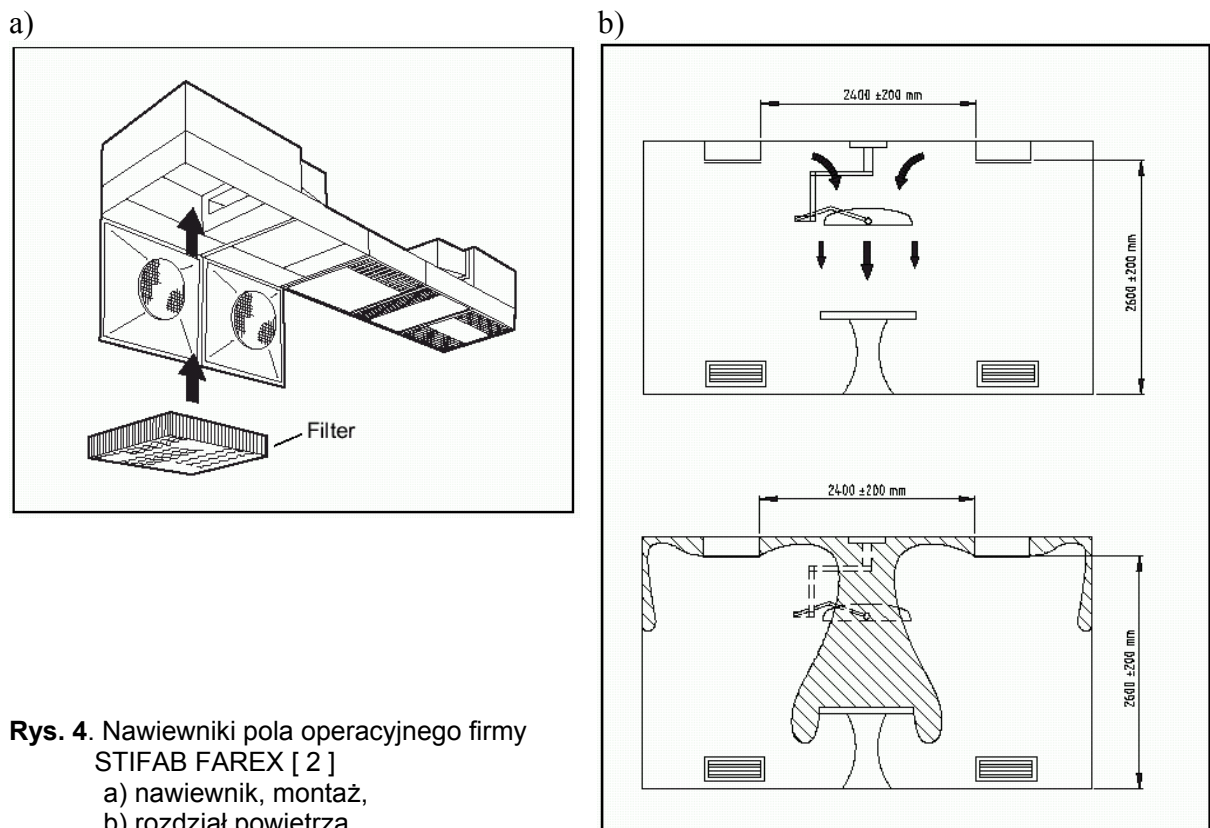
Nawet przy stosowaniu sterylnej odzieży ochronnej każda osoba wchodząca w skład zespołu operacyjnego emituje $1\,500 \div 50\,000$ mikroorganizmów i pyłów w ciągu minuty. Wynika stąd z jednej strony postulat maksymalnego ograniczenia emisji mikroorganizmów w obszarze pola operacyjnego w celu zmniejszenia obciążeń dla klimatyzacji, a z drugiej strony wnioski, iż system klimatyzacyjny jest bardzo ważnym, lecz nie jedynym czynnikiem decydującym o wynikowej czystości mikrobiologicznej powietrza w obszarze stołu operacyjnego.

Dla sal wysokoaseptycznych (transplantacje, poparzenia, operacje serca, operacje mózgu), gdzie dominować powinien przepływ waporowy w strefie pola operacyjnego, możliwe są trzy skuteczne w praktyce systemy rozdziału powietrza: kabina operacyjna, strop nawiewny z kurtyną wzdłuż obwodu (folia, szyba szklana) lub strop nawiewny z recyrkulacją. Niekiedy strop recyrkulacyjny wyposażony jest dodatkowo w kurtynę wzdłuż obwodu. Rozwiązanie w tym zakresie firmy WEISS Klimatechnik przedstawiono na rys. 3. Każdorazowo efekt waporowy nad polem operacyjnym uzyskuje się poprzez zwiększoną prędkość powietrza, hermetyzację oraz wydłużenie strumienia waporowego.



Rys. 3. Strop nawiewny z recyrkulacją i kurtyną firmy WEISS Klimatechnik [1]

Dla sal aseptycznych i septycznych standardem w zakresie rozdziału powietrza jest klasyczny strop nawiewny nad polem operacyjnym, natomiast dla sal zabiegowo-operacyjnych również nawiewniki skośne. Oryginalnym i bardzo ekonomicznym rozwiązaniem systemu rozdziału powietrza dla sal septycznych i zabiegowych jest układ dwóch zamontowanych równoległe nawiewników sufitowych nad polem operacyjnym firmy Stifab Farex, w którym jądro strumienia powietrza sterylnego obejmuje pole operacyjne. Rozwiązanie to przedstawiono na rys. 4.

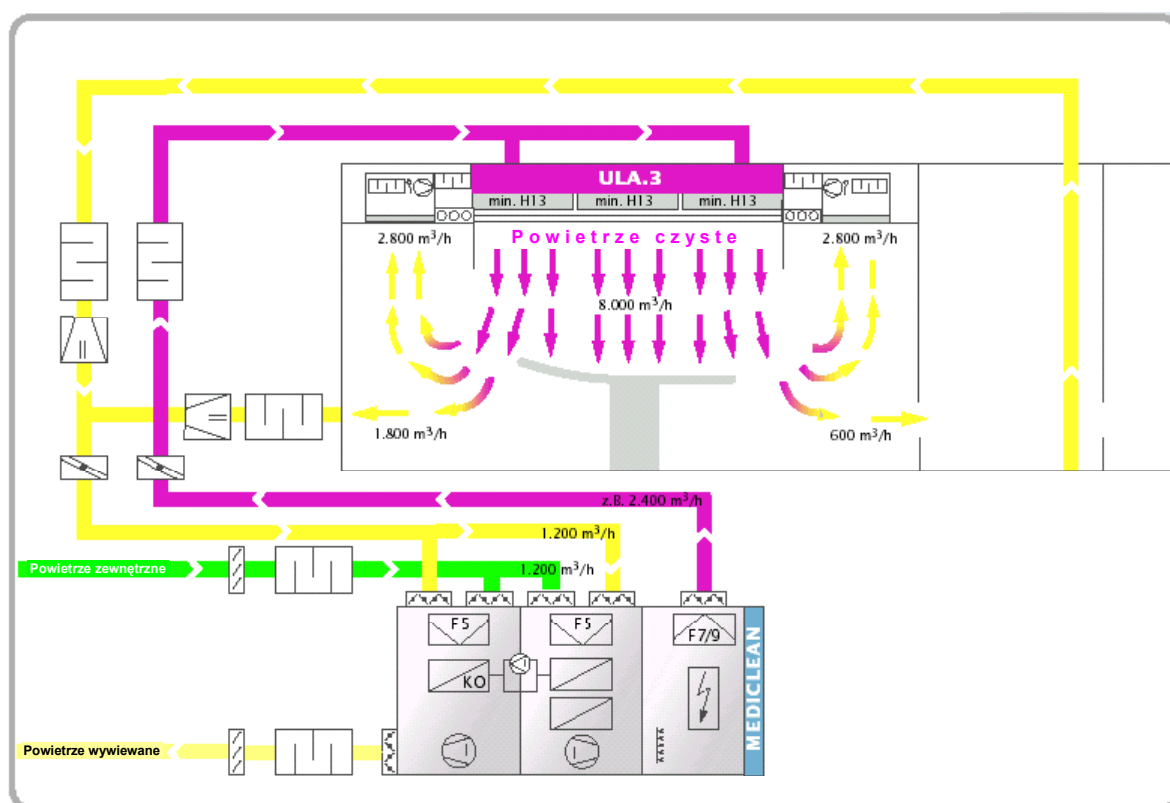


Rys. 4. Nawiewniki pola operacyjnego firmy STIFAB FAREX [2]

- a) nawiewnik, montaż,
- b) rozdział powietrza

Strumień powietrza nawiewanego dla sali operacyjnej wynika głównie z wymaganego dla danej klasy czystości pola prędkości, bowiem niezbędna ilość powietrza potrzebna dla odprowadzenia obciążeń cieplnych jest na ogół mniejsza. **Udział powietrza zewnętrznego** i związany z tym stopień recyrkulacji są w warunkach polskich uwarunkowane uzyskaniem odpowiedniej zgody państwowego wojewódzkiego inspektora sanitarnego oraz stosowanymi przepisami szczegółowymi [6, 7].

Ilość powietrza w sposób bezpośredni wpływa na wielkość urządzeń, w szczególności centrali klimatyzacyjnej i stropu nawiewnego. Dla dużych ilości powietrza wymaganych dla sal wysokoaseptycznych, względy ekonomiczne prowadzą do koncepcji stropu recyrkulacyjnego i centrali klimatyzacyjnej, której wielkość wynika wówczas jedynie z funkcji odprowadzenia obciążeń. W takim przypadku zapewnienie wymaganego pola prędkości i oczyszczania na trzecim stopniu filtracji pełni strop recyrkulacyjny, a centrala klimatyzacyjna jest zdecydowanie mniejsza – maleją koszty obróbki termodynamicznej oraz koszty przetłaczania. Rozwiązanie układu klimatyzacyjnego dla sal wysokoaseptycznych ze stropem recyrkulacyjnym firmy Weiss Klimatechnik przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Układ klimatyzacyjny ze stropem nawiewnym recyrkulacyjnym firmy Weiss Klimatechnik [1]

Bardzo ważnym, niekiedy dominującym kryterium wyboru układu klimatyzacyjnego dla bloku operacyjnego są **uwarunkowania architektoniczne**. Dotyczy to w szczególności istniejących budynków, w których dokonuje się modernizacji układów wentylacyjnych i klimatyzacyjnych oraz budynków aktualnie przekazywanych do eksploatacji, których konstrukcja została zaprojektowana wcześniej. Budynki te na ogół nie spełniają aktualnych wymagań w zakresie wysokości i powierzchni pomieszczeń sal operacyjnych, układu funkcjonalnego oraz przestrzeni technicznych. Eliminuje to w praktyce projektowej możliwość zastosowania stropu recyrkulacyjnego, bowiem strop ten jest wyższy od standardowych. Istotnym problemem projektowym w istniejących budynkach jest często brak

przestrzeni technicznej dla central klimatyzacyjnych, które z racji rozbudowanej struktury (dwa stopnie filtracji, bloki inspekcyjne) w wersji klasycznej są relatywnie długie. Atrakcyjną propozycją w takim przypadku są rozwiązania central klimatyzacyjnych z dwustopniową filtracją w formie modułowych szaf o różnej konfiguracji, zintegrowanych z układem chłodniczym – rys. 5,6 [1].



Rys. 6. Modułowa szafa klimatyzacyjna MEDICLEAN firmy Weiss Klimatechnik [1]:
 1 - obudowa, 2 - wentylatory, filtry, nawilżacze, 3 - filtry kieszeniowe i kasetowe,
 4 - parowniki/wymiennik wody lodowej, 5 - sekcja chłodzenia, 6 - wirniki,
 7 - panel przyłączeniowy

Poszczególne moduły: chłodzenia, nagrzewania, nawilżania oraz moduł skraplacza z odzyskiem ciepła mogą być posadowione w różnych opcjach (U, L). Ze względu na możliwość lokalizacji w sąsiedztwie pomieszczeń klimatyzowanych i relatywnie niewielkie nakłady prac budowlanych, rozwiązanie to jest korzystne ekonomiczne, niekiedy jest również jedynym możliwym rozwiązaniem ze względu na uwarunkowania architektoniczne.

Uwarunkowania architektoniczne i technologiczne w zakresie wyposażenia sal operacyjnych prowadzą do rozwiązań zintegrowanych, w których strop nawiewny nad polem operacyjnym zintegrowany jest z kurtyną, mostem anestezyjnym, wózkiem sprzętowym oraz oświetleniem. Jest to dominujący kierunek rozwiązań w tym zakresie. Istotnym parametrem komfortu klimatycznego, który powinien być spełniony w pomieszczeniach bloku operacyjnego jest **dopuszczalny poziom hałasu**. Hałas przenoszony materiałowo lub kanałowo ze strumieniem powietrza z central klimatyzacyjnych jest na ogół możliwy do wyeliminowania. Bardzo trudne jest natomiast spełnienie rygorystycznych wymagań Polskich Norm w zakresie dopuszczalnego poziomu hałasu w salach operacyjnych z sufitami nawiewnymi, a w przypadku stropów nawiewnych recyrkulacyjnych jest ono praktycznie niemożliwe. Zwiększony poziom hałasu dla stropów nawiewnych recyrkulacyjnych jest ich istotną wadą, o wyborze tej opcji decyduje jednak na ogół całokształt czynników, głównie względy ekonomiczne. Hałas jest również istotnym kryterium lokalizacji central klimatyzacyjnych, ze względu na możliwości zainstalowania tłumików akustycznych o odpowiednich wymiarach oraz izolacyjność akustyczną przegród budowlanych.

Kolejnymi kryteriami, które powinien brać pod uwagę projektant przy wyborze układu klimatyzacyjnego dla bloku operacyjnego jest **jakość regulacji parametrów i strategia sterowania**, a także **niezawodność działania** i dotrzymania parametrów. Rozwiązania w tym zakresie obejmują zastosowanie urządzeń strefowych dla umożliwienia indywidualnej

regulacji parametrów powietrza w poszczególnych pomieszczeniach lub regulację tych parametrów tylko w sali operacyjnej – wówczas parametry w pomieszczeniach pozostałych będą wynikowe. W opcji sterowania regulowane mogą być również uśrednione parametry w kilku pomieszczeniach pod warunkiem, iż mieszczą się w przedziale dopuszczalnym. Niezawodność działania układu klimatyzacyjnego implikuje na ogół wybór urządzeń sprawdzonych o wysokiej jakości, w szczególnych przypadkach zastosowanie układu równoległego z centralą rezerwową. Nadrzędnym kryterium wyboru układu klimatyzacyjnego dla bloku operacyjnego – przy założeniu spełnienia wymagań normowanych w zakresie jakości i parametrów termodynamicznych powietrza są łączne *koszty inwestycyjne i eksploatacyjne* dla poszczególnych wariantów rozwiązań. Modelowo, wymaga to przeprowadzenia analizy ekonomicznej dla poszczególnych rozwiązań w okresie życia instalacji (faza wykonania, eksploatacji i demontażu). Ocena kosztów eksploatacyjnych związana jest z analizą zużycia energii przez układy klimatyzacyjne w ciągu całego roku w oparciu o parametry klimatyczne roku porównawczego oraz wymagane parametry powietrza w pomieszczeniach bloku operacyjnego.

5. Podsumowanie

Zagadnienie wyboru układu klimatyzacyjnego dla bloku operacyjnego jest zagadnieniem wielokryterialnego podejmowania decyzji. Kryterium nadrzędnym jest spełnienie wymagań normowych dotyczących wymaganych parametrów termodynamicznych powietrza, czystości, układu ciśnień i poziomu hałasu. Pozostałe kryteria obejmują zarówno uwarunkowania technologiczne, architektoniczne i konstrukcyjne, wymagania w zakresie jakości regulacji, strategii sterowania i monitoringu, wymagania w zakresie bezpieczeństwa i niezawodności, wreszcie łączne koszty inwestycyjne i eksploatacyjne w okresie życia instalacji. Implikuje to wiele możliwości rozwiązań w zależności od wymienionych uwarunkowań, stąd też trudno o generalne wnioski dotyczące rozwiązań optymalnych układów klimatyzacyjnych bloków operacyjnych. Można natomiast wskazać interesujące kierunki rozwiązań do których należą rozwiązania układów klimatyzacyjnych sal operacyjnych zintegrowane z ich wyposażeniem technologicznym, układy zdecentralizowane ze stropami recyrkulacyjnymi, modułowe rozwiązania central klimatyzacyjnych w formie szaf zintegrowane z układem chłodniczym korzystne przy modernizacji istniejących instalacji, układy strefowe regulacji parametrów oraz zaawansowane technologicznie układy sterowania i monitoringu.

6. Literatura

- [1]. Katalog firmy WEISS Klimatechnik GmbH, Geräte-und Anlagenbau (Niemcy) 2003.
- [2]. Katalog firmy STIFAB FAREX (Szwecja) 2003.
- [3]. Kruczkowski P., Wytyczne projektowania szpitali ogólnych. Instalacje sanitarne. Z. 5. Wentylacja i klimatyzacja, Biuro Projektów Służby Zdrowia, Warszawa 1994.
- [4]. PN-87/B-02151/02, Akustyka budowlana. Ochrona przed hałasem pomieszczeń budynkach. Dopuszczalne wartości poziomu dźwięku w pomieszczeniach.
- [5]. Porowski M., Szczechowiak E., Klimatyzacja pomieszczeń czystych, Termedia Poznań 1999.
- [6]. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. Dz.U. Nr 75, poz. 690.
- [7]. Tymczasowe wytyczne MZiOS stosowania recyrkulacji powietrza wewnętrznego w Zakładach Opieki Zdrowotnej MZiOS, 15 marca 1996.