

Aleksandra SIEROTA, Sylwia SZCZEŚNIAK*

WPLYW NAWIEWU WSPOMAGAJĄCEGO NA STRUMIEN POWIETRZA WENTYLUJĄCEGO PRZY STROPACH LAMINARNYCH

W artykule porównano zapotrzebowanie energii do uzdatniania i transportu powietrza dla dwóch systemów, obsługujących dwie podobne pod względem geometrii i charakterystyki obciążeń cieplnych sale operacyjne. W jednej z sal operacyjnych zastosowano typowy strop laminarny, w drugiej natomiast strop laminarny z nawiewem osłonowym. Dla omawianych sal przedstawiono wykresy charakterystyki cieplnej, i-x Molliera, z naniesionymi przemianami termodynamicznymi którym podlega powietrze uzdatniane. Ponadto zamieszczono zbiorcze zestawienie zapotrzebowania na energię do uzdatniania i transportu powietrza.

1. WSTĘP

Pomieszczenia wchodzące w skład bloków operacyjnych podlegają ścisłym wytycznym dotyczącym parametrów powietrza w pomieszczeniach. Jednocześnie stawiane wymagania nie dają zbyt dużego pola manewru projektantom, którzy są zobligowani, przez obecne przepisy, do poszukiwania rozwiązań zmniejszających zużycie energii.

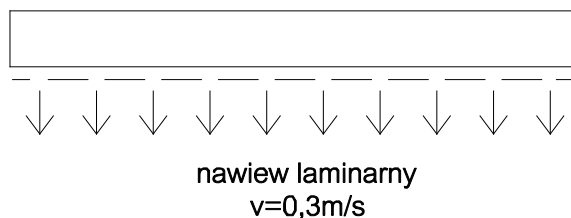
Dla pomieszczeń o szczególnych wymaganiach odnośnie czystości powietrza zalecane jest stosowanie laminarnego bądź niskoturbulentnego przepływu powietrza. Dzięki takiemu rozwiązaniu można zminimalizować ryzyko wystąpienia między innymi infekcji pooperacyjnych. Uzyskanie takich warunków przepływu jest możliwe np. poprzez zastosowanie stropów laminarnych.

Przy doborze stropów laminarnych należy zwrócić uwagę na to, aby w strumieniu powietrza czystego znajdowały się wszystkie obszary wymagające specjalnej ochrony (pole operacyjne, zespół operacyjny, stolik narzędziowy). Wytyczne znajdujące się w europej-

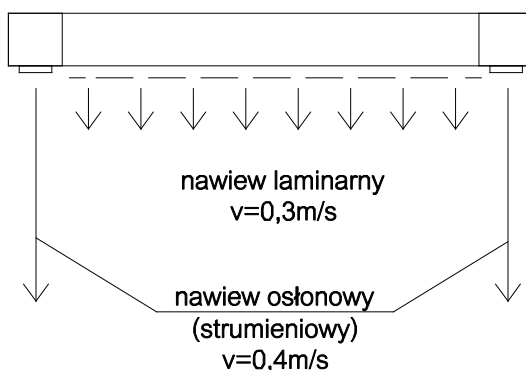
* Politechnika Wroclawska, Wydział Inżynierii Środowiska, ul. K. Norwida 4/6, 50-373 Wrocław, aleksandra.sierota@pwr.edu.pl.

skich normach [2, 11] zazwyczaj określają wymagany obszar chroniony dla sal operacyjnych o najwyższych wymaganiach odnośnie czystości powietrza jako $\geq 9 \text{ m}^2$ lub proponują stosować strop laminarny o wymiarach minimalnych $3,2 \times 3,2 \text{ m}$.

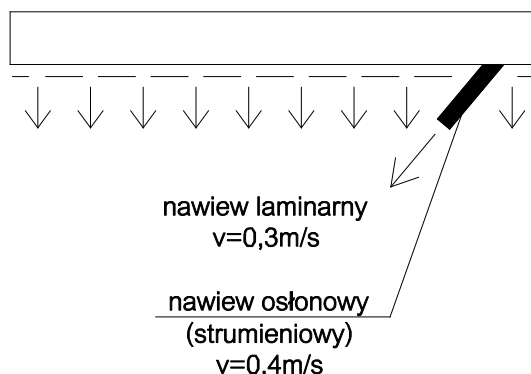
Eksploatacja instalacji wentylacyjnych, w wysoko aseptycznych salach operacyjnych, w których zastosowane zostaną stropy laminarne, jest procesem energochłonnym. Dodatkowo wymóg całodobowej pracy instalacji, mający na celu zapewnienie odpowiedniego gradientu ciśnień w bloku operacyjnym, jest przyczyną poszukiwania nowych, bardziej energooszczędnych rozwiązań. Jedną z propozycji pozwalających uzyskać znaczne oszczędności, podczas eksploatacji urządzeń, jest rozwiązanie dotyczące nawiewy powietrza do sali. Zastosowanie przepływu łączącego w sobie cechy turbulentnego i wyporowego daje dobre rezultaty zarówno od strony zachowania czystości jak i kosztów eksploatacji urządzeń. Poniżej przedstawiono przykładowe rozwiązania stropów laminarnych.



Rys. 1. Zasada działania typowego stropu laminarnego



Rys. 2. Zasada działania stropu laminarnego z nawiewem strumieniowym i wyporowym



Rys. 3. Zasada działania stropu laminarnego wyposażonego w dysze z nawiewem strumieniowym i wyporowym

2. CHARAKTERYSTYKA ANALIZOWANEGO OBIEKTU

Sale bloku operacyjnego oddziału chirurgii urazowo-ortopedycznej znajdują się w szpitalu zlokalizowanym we Wrocławiu. Zakres działalności oddziału to przede wszystkim: endoprotezoplastyka stawów biodrowych i kolanowych, artroskopia stawów, rekonstrukcje, artroskopia uszkodzenia stawów barkowych i kolanowych, zabiegi korekcyjne stopy, a także zabiegi w zakresie zmian chorobowych tkanek miękkich dłoni.

Budynek został wybudowany pod koniec XIX wieku, a sam oddział chirurgii urazowo-ortopedycznej znajduje się na parterze, z kolei pod nim zlokalizowana jest piwnica przeznaczona na pomieszczenia techniczne.

W skład bloku operacyjnego wchodzi dwie sale operacyjne wraz z podlegającymi im pomieszczeniami przygotowania pacjenta oraz lekarzy, trakty komunikacyjne oraz sala wybudzeń. Obie sale mają takie same wymiary, przeznaczenie; charakterystykę obciążeń cieplnych, a ich działanie jest od siebie niezależne.

Ściany zewnętrzne z cegły ceramicznej pełnej o grubości 76 cm, współczynnik przenikania ciepła $U = 0,66 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Straty ciepła w budynku pokrywa instalacja centralnego ogrzewania.

Na podstawie informacji uzyskanych od technologa oraz danych literaturowych [2], sporządzono zestawienie urządzeń medycznych i liczby osób znajdujących się w bloku operacyjnym, a także w pomieszczeniach pomocniczych. Lamy bezcieniowe zaliczono do elementów technologii.

3. OPIS PRZYJĘTEGO ROZWIĄZANIA

Sale operacyjne wraz z pomieszczeniami pomocniczymi (pomieszczenie przygotowania lekarzy i pacjenta) podzielono na dwa odrębne systemy – umożliwiając w ten sposób ich niezależną pracę i znacznie upraszczając system sterowania.

Przyjęte parametry fizyczne powietrza:

- temperatura powietrza w pomieszczeniu 20–25°C,
- wilgotność względna w sali operacyjnej 50–60%,
- prędkość przepływu powietrza w strefie przebywania ludzi 0,3–0,5 m/s – wypowory przepływ powietrza, wypływ ze stropów laminarnych,
- dopuszczalny poziom ciśnienia akustycznego dla wyposażenia technicznego w pomieszczeniach ochrony zdrowia 35 dB(A).

Opierając się na wytycznych [11] zdecydowano się na zastosowanie w pomieszczeniach sal operacyjnych (klasa czystości H1a) laminarnych stropów nawiewnych z obszarem chronionym obejmującym pole operacyjne oraz stolik narzędziowy.

Z uwagi na odrębność działania systemów wentylacyjnych obsługujących obie sale operacyjne, zdecydowano się na zastosowanie w nich dwóch różnych stropów laminarnych.

W sali nr 1 – klasyczny strop o powierzchni obszaru chronionego obejmującego całe pole operacyjne wraz ze stolikiem narzędziowym, natomiast w sali nr 2 – strop laminarny z nawiewem wspomagającym o powierzchni obszaru chronionego, obejmującego jedynie pole operacyjne.

Dla sali operacyjnej nr 1 dobrano strop laminarny, o wymiarach 3000×3000 mm, wysokości $H = 450$ mm, czterech przyłączach zasilających o wymiarach 945×230, wadze 360 kg, wyposażony w filtr klasy H13.

Wydajność przy prędkości 0,24 m/s 7400 m³/h, wydajność maksymalna 20300 m³/h dla założonej średniej wartości prędkości powietrza nawiewanego – 0,27 m/s strumień powietrza nawiewanego wynosi 8000 m³/h. Strata ciśnienia dla stropu laminarnego (wstępna): 105 Pa. Strata ciśnienia przy której należy wymienić filtr: 600 Pa.

Dla sali operacyjnej nr 2 dobrano strop laminarny z nawiewem wspomagającym o wymiarach 2400×3000 mm, wysokości $H = 440$ mm, jednym przyłączu zasilającym o wymiarach 1326×316, wadze 350 kg, wyposażony w filtr klasy H13. Wydajność przy prędkości 0,15 m/s 2400 m³/h dla założonej średniej wartości prędkości powietrza nawiewanego – 0,35 m/s strumień powietrza nawiewanego wynosi 4800 m³/h. Strata ciśnienia dla stropu laminarnego: 140 Pa. Strata ciśnienia, przy której należy wymienić filtr: 500 Pa.

Powietrze z sal operacyjnych usuwane jest w 20% w górnej części pomieszczenia przez kratki wywiewne i w 80% w strefie dolnej przez kratki wywiewne wyposażone w łapacze ligniny.

Celem ograniczenia zapotrzebowania na energię do uzdatniania powietrza nawiewanego zastosowano krzyżowy wymiennik do odzysku ciepła o sprawności temperaturowej 60%.

Centrale wentylacyjne wykonane w wersji higienicznej, umiejscowione zostały w piwnicy, w pomieszczeniach technicznych. Dla każdego systemu dobrano po dwa odrębne nawilżacze parowe – jeden główny dla całego systemu wentylacyjnego, drugi podlegający jedynie pod salę operacyjną.

W celu zapewnienia stałego strumienia powietrza napływającego do poszczególnych pomieszczeń lub stref, dobrano regulatory stałego wydatku (CAV).

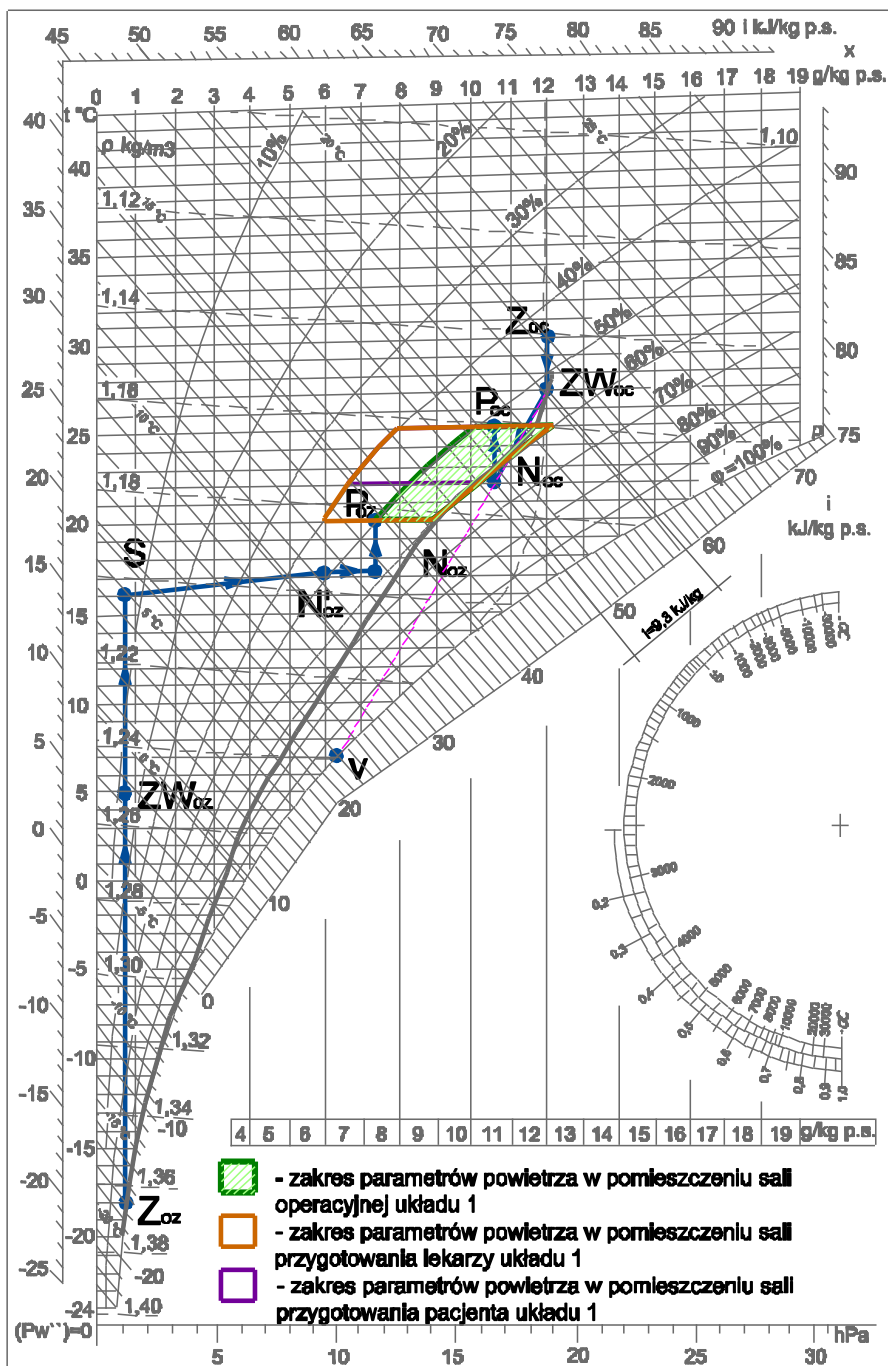
Straty statyczne budynku pokrywa w całości instalacja centralnego ogrzewania.

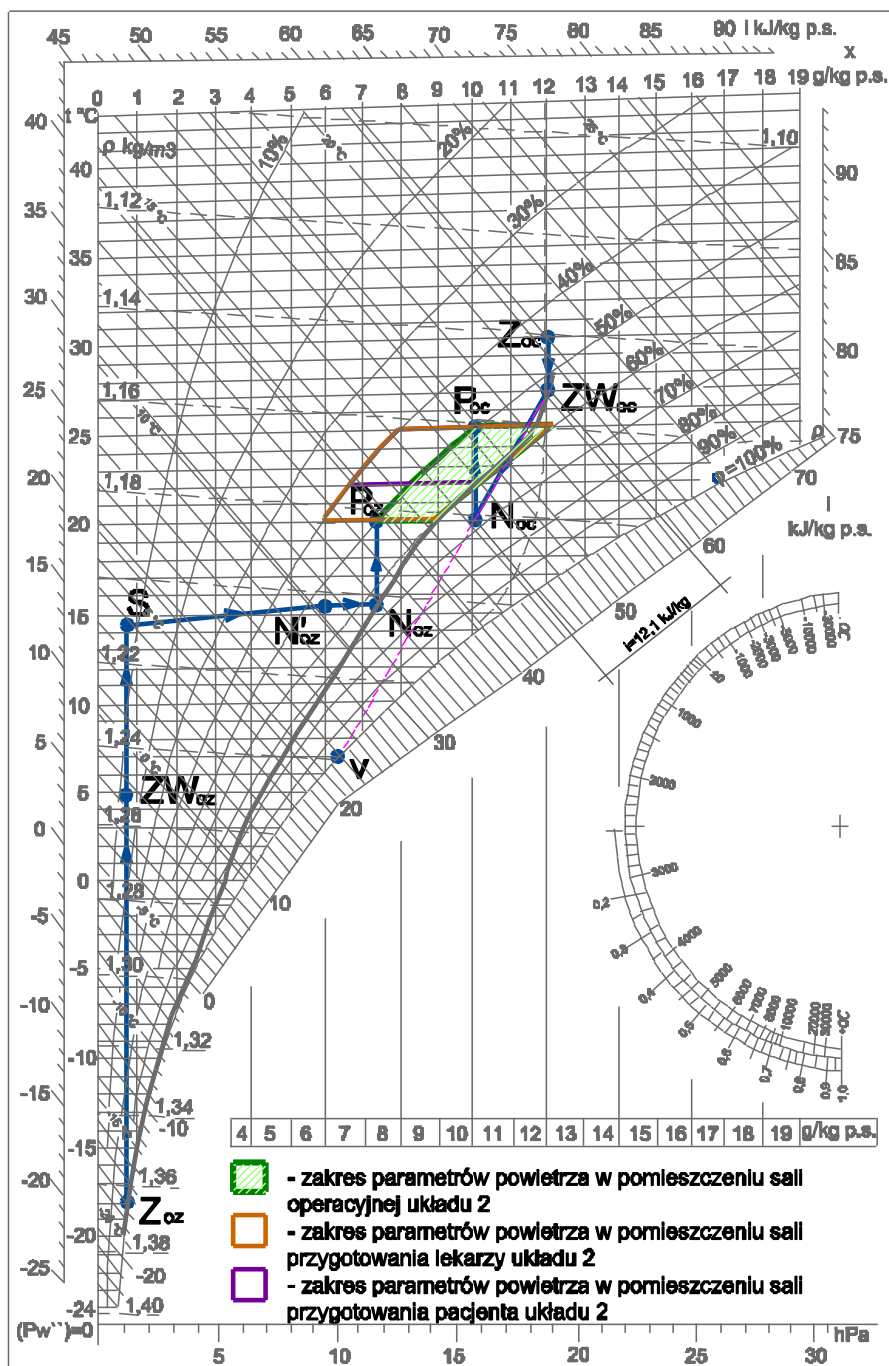
4. ANALIZA EKONOMICZNA PRACY UKŁADU

4.1. BILANS ZYSKÓW CIEPŁA

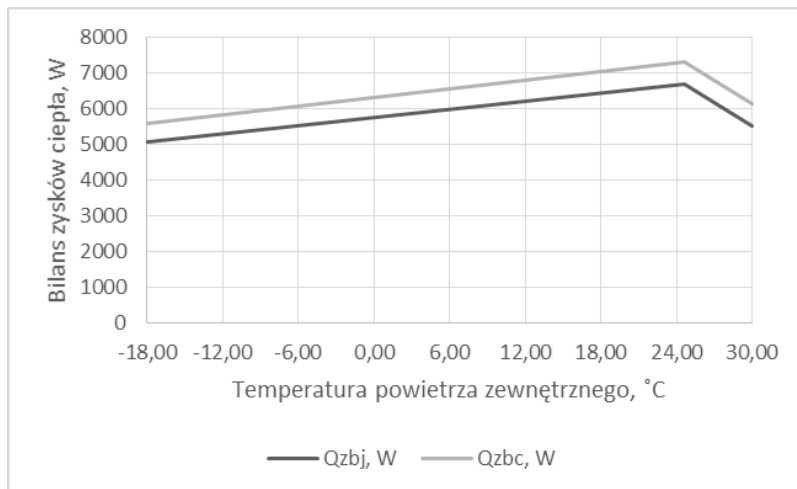
Obliczenia bilansu ciepła przeprowadzono metodą tabelaryczną, wykonano je dla obu sal operacyjnych oraz dla pomieszczeń pomocniczych. W trakcie obliczeń, w celu zobrazowania przemian powietrza, korzystano z wykresu $i-x$ (wykres Molliera). Na tej podstawie dobrano podstawowe urządzenia obróbki powietrza. Przemiany powietrza dla analizowanego przypadku przedstawiono na rysunkach rys. 4 i 5.

Zmienność zysków ciepła w cyklu całorocznym zobrazowano, w formie wykresu zależności obciążeń cieplnych w funkcji chwilowej temperatury powietrza zewnętrznego – rys. 6.

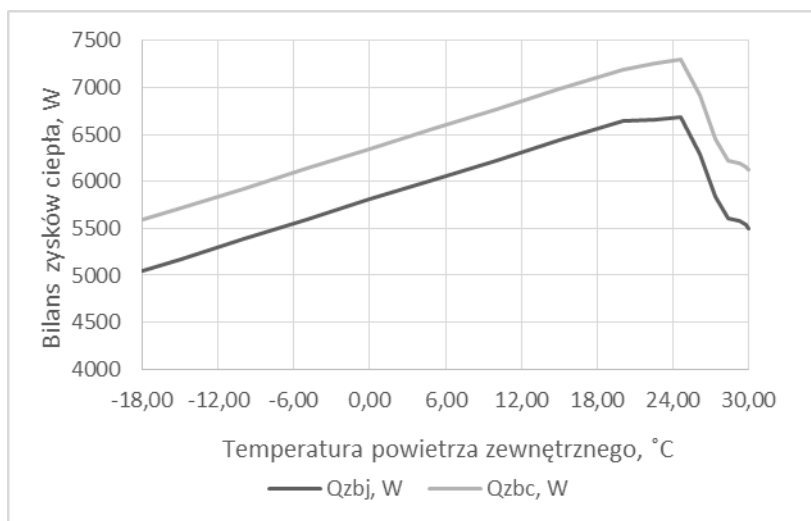
Rys. 4. Wykres $i-x$ dla układu 1



Rys. 5. Wykres $i-x$ dla układu 2



Rys. 6. Uproszczony przebieg zmienności bilansów ciepłych w funkcji temperatury powietrza zewnętrznego dla pomieszczenia sali operacyjnej. Q_{zbc} – bilans ciepła całkowitego zbudnego w W, Q_{zbj} – bilans ciepła jawnego zbudnego w W



Rys. 7. Przewidywany przebieg zmienności bilansów ciepłych w funkcji temperatury powietrza zewnętrznego dla pomieszczenia sali operacyjnej. Q_{zbc} – bilans ciepła całkowitego zbudnego w W, Q_{zbj} – bilans ciepła jawnego zbudnego w W

4.2. ANALIZA CAŁOROCZNEJ PRACY WENTYLATORÓW

Celem wykonania całorocznej analizy pracy poszczególnych urządzeń tj. nagrzewnicy, chłodnicy, wymiennika krzyżowego, wykonano uproszczenie wykresu przebiegu zmienności bilansów cieplnych i na tej podstawie wykreślono wykres $t-t_z$.

Przeprowadzono analizę zapotrzebowania na energię do uzdatnia powietrza, przyjmując dwuzmianowy rodzaj pracy (czas trwania 5506 h/rok). Uwzględniono także przerwy technologiczne oraz okresy gdy sale operacyjne są w trybie gotowości (czas trwania 3254 h/rok). W tym przypadku obniża się wydajność układu do 50%, spełniając jedynie warunek nadciśnienia w stosunku do pozostałych pomieszczeń w bloku operacyjnym. Pozwala to na utrzymanie odpowiednich warunków higienicznych powietrza w pustej sali i uniemożliwienie wnikanie zanieczyszczeń z zewnątrz w wyniku infiltracji.

Obniżenie wydajności układu uzyskuje się poprzez zmniejszenie prędkości obrotowej wentylatorów. Do obliczeń wymaganego mocy założono, że zapotrzebowanie na moc jest proporcjonalne do trzeciej potęgi wydajności wentylatora:

$$\frac{V_1}{V} = \left(\frac{N_1}{N} \right)^3 \quad (1)$$

Gdzie: V – strumień objętości powietrza przepływający przez wentylator, w m^3/h ; N – moc wentylatora, odczytana z katalogu, w kW.

$$E_{\text{TW}} = \sum_n^{i=1} \tau_i \times N_{\text{wi}} \quad (2)$$

Gdzie: E_{TW} – zapotrzebowanie na energię do transportu powietrza, wentylator wywiewny, w kWh; τ – przeciętny czas występowania temperatur powietrza zewnętrznego, w h; N_{wi} – moc wentylatora wywiewnego, odczytana z katalogu, w kW.

$$E_{\text{TN}} = \sum_n^{i=1} \tau_i \times N_{\text{Ni}} \quad (3)$$

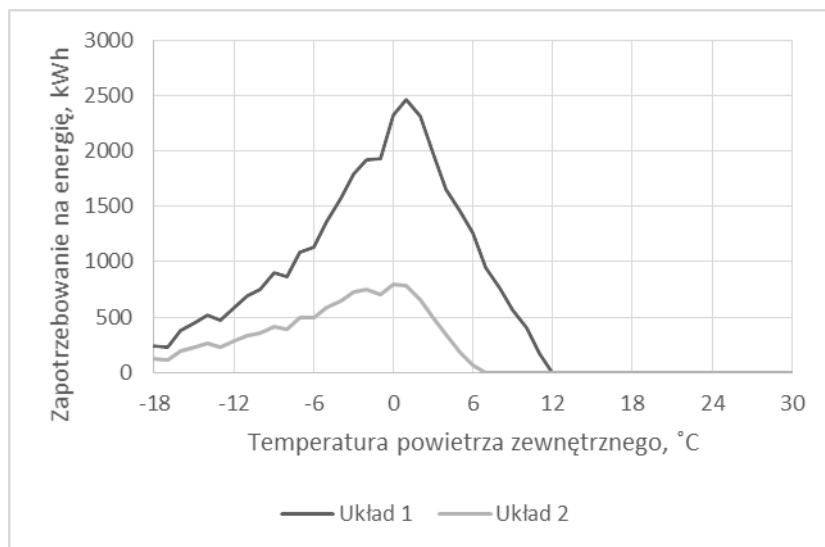
Gdzie: E_{TN} – zapotrzebowanie na energię do transportu powietrza, wentylator nawiewny, w kWh; τ – przeciętny czas występowania temperatur powietrza zewnętrznego, odczytana z katalogu, w h; N_{Ni} – moc wentylatora nawiewnego, odczytana z katalogu, w kW.

Tabela 1. Zapotrzebowanie na energię do transportu powietrza dla wentylatorów nawiewnych i wywiewnych obu układów

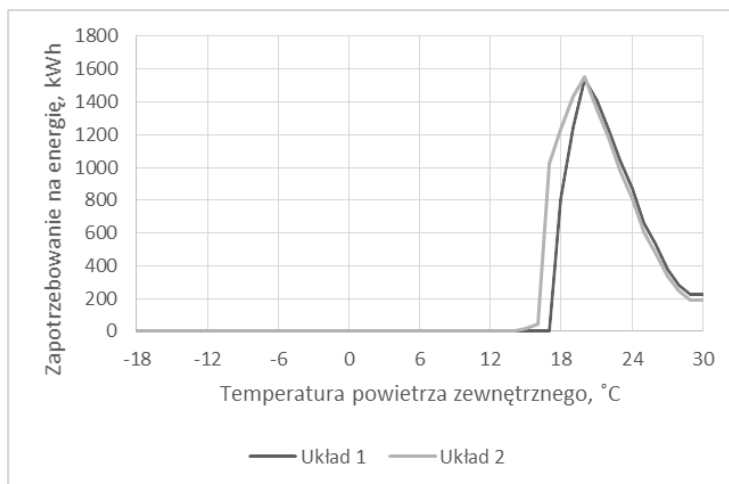
		τ	V	N_N	E_{TN}	N_W	E_{TW}
		h	m ³ /s	kW	kWh	kW	kWh
układ 1	normalny	5822	2,38	4,34	25267	2,34	13623
	przerwa	2938	1,19	3,45	10136	1,86	5465
układ 2	normalny	5822	1,52	3,24	18863	1,92	11178
	przerwa	2938	0,76	2,57	7551	1,52	4466
				ΣE_{TNI} [kWh]	35404	ΣE_{TWI} [kWh]	19088
				ΣE_{TNI} [kWh]	26414	ΣE_{TWII} [kWh]	15644

4.3. ANALIZA CAŁOROCZNEJ PRACY UKŁADU

Przeprowadzono analizę pracy wszystkich urządzeń uzdatniających powietrze wchodzących w skład omawianych systemów klimatyzacyjnych. Na tej podstawie sporządzono wykresy zapotrzebowania na energię do transportu i uzdatniania powietrza w funkcji chwilowej temperatury powietrza zewnętrznego.

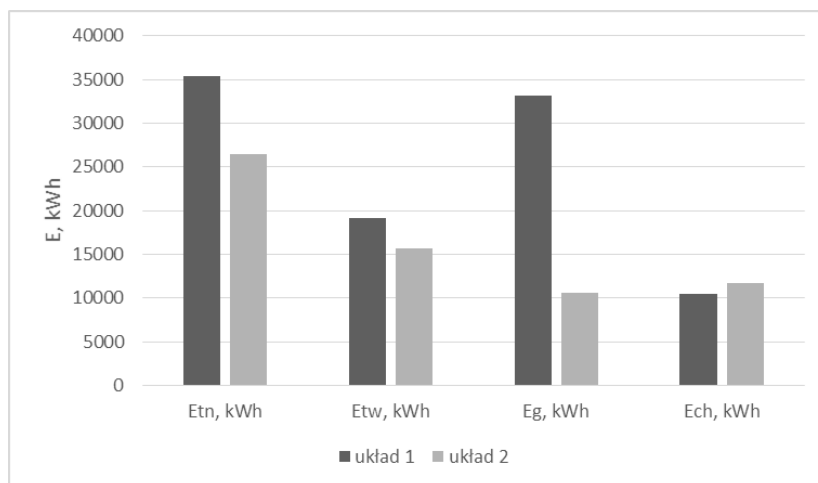


Rys. 8. Zapotrzebowanie na energię do ogrzewanie powietrza w funkcji temperatury powietrza zewnętrznego



Rys. 9. Zapotrzebowanie na energię do ochładzania powietrza w funkcji temperatury powietrza zewnętrznego

Korzystając z wykresu przeciętnego czasu występowania temperatury powietrza zewnętrznego oraz sporządzonego wykresu $t-t_z$, obliczono całoroczne zapotrzebowanie energii do ogrzewania, ochładzania oraz transportu powietrza. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 10.



Rys. 10. Zapotrzebowanie na energię do uzdatniania i transportu powietrza dla obu układów, E_{tn} – zapotrzebowanie na energię do transportu powietrza strumienia nawiewnego w kWh, E_{tw} – zapotrzebowanie na energię do transportu powietrza strumienia wywiewnego w kWh, E_g – zapotrzebowanie na energię do ogrzewania powietrza w kWh, E_{ch} – zapotrzebowanie na energię do ochładzania powietrza w kWh

5. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono analizę systemów klimatyzacji dla dwóch identycznych pod względem przeznaczenia, wymiarów oraz charakterystyki obciążeń cieplnych sal operacyjnych, znajdujących się w jednym bloku operacyjnym, podlegającym pod oddziaływanie chirurgii urazowo-ortopedycznej. Zaprojektowano dwa niezależnie działające systemy wentylacji. Zdecydowano się na zastosowanie w nich dwóch różnych stropów laminarnych – klasycznego oraz z nawiewem wspomagającym, mającym na celu ograniczyć strumień powietrza nawiewanego do pomieszczenia.

Konieczność utrzymania wymagań dotyczących czystości i rodzaju przepływu powietrza przez sale operacyjne powoduje, że najczęściej wybieranym rozwiązaniem są stropy laminarne, które dla właściwej pracy wymagają znacznych strumieni powietrza. Pociąga to za sobą znaczne koszty związane z eksploatacją urządzeń, czyli zapotrzebowaniem na energię do transportu i uzdatniania powietrza.

Jednym ze sposobów ograniczenia zużycia wyżej wymienionych energii jest zmniejszenie strumienia powietrza nawiewanego do sal operacyjnych. Rozwiązanie takie jest możliwe, np. poprzez wykorzystanie skupionego nawiewu osłonowego.

Skutkiem ograniczenia strumienia powietrza nawiewanego i wywiewanego jest zmniejszenie zapotrzebowania na energię do transportu powietrza o ok 23% w stosunku do systemu ze stropem tradycyjnym.

Dodatkowo systemy z mniejszym strumieniem powietrza z reguły charakteryzują się mniejszą stratą ciśnienia, a przez to mniejszą mocą do napędu wentylatora.

Ponadto w przypadku rozwiązania z nawiewem osłonowym, przy założeniu, że straty statyczne ciepła pokrywa w całości instalacja centralnego ogrzewania, nagrzewnica pracuje krócej, w porównaniu do instalacji której elementem nawiewnym jest tradycyjny strop laminarny. W tym przypadku ograniczenie zużycia energii może sięgać ponad 50%.

W salach operacyjnych w systemach klimatyzacyjnych zastosowane są również nawilżacze parowe, których wydajność zależy między innymi od strumienia powietrza klimatyzującego. W przypadku dwóch porównywanych systemów, mniejsze zapotrzebowanie na energię do nawilżania powietrza dotyczy systemu z nawiewem osłonowym i daje oszczędności rzędu 35%.

Praca współfinansowana w ramach badań statutowych S40-012.

LITERATURA

- [1] CHARKOWSKA A., *Nowoczesne systemy klimatyzacji w obiektach służby zdrowia*, IPPU MASRA, Gdańsk 2000.
- [2] DIN 1946-4:2008-12 Ventilation and air conditioning – Part 4: VAC systems in buildings and rooms used in the health care sector.

- [3] ISO14644-1: Pomieszczenia czyste i związane z nimi środowiska kontrolowane Część 1: Klasyfikacja i czystość powietrza.
- [4] KAISER K., WOLSKI A., *Klimatyzacja i wentylacja w szpitalach. Teoria i praktyka eksploatacji*. I.P.P.U. MASTA. Gdańsk 2007.
- [5] MENCEL S., *Klimatyzacja pomieszczeń czystych*, Magazyn Instalatora, 4/2011, 5/2011, 8/2011, 10/2011.
- [6] PELECH A., *Wentylacja i klimatyzacja – podstawy*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2008.
- [7] PN-B-76003,1996 *Wentylacja i klimatyzacja. Filtry powietrza. Klasy jakości*.
- [8] POROWSKI M., SZCZECHOWIAK E., *Klimatyzacja pomieszczeń czystych*, Termedia, Poznań 1999.
- [9] PRZYDRÓŻNY S., FERENCOWICZ J., *Klimatyzacja*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1988.
- [10] Rozporządzenie Ministra Zdrowia i Opieki Społecznej z dnia 21.09.1992 r. w sprawie wymagań jakim powinny odpowiadać pod względem fachowym i sanitarnym pomieszczenia i urządzenia zakładu opieki zdrowotnej. (Dz. U. Nr 74/1992 poz. 366).
- [11] Ventilation for hospitals, Final draft technical report FprCEN/TR 16244:2011 (E), April 2011.

THE INFLUENCE OF AUXILIARY AIRFLOW IN LAMINAR FLOW SYSTEM ON AIRFLOW VOLUME

The article presents a comparison between the energy consumption for air purification and transport of two ventilation systems. Both systems supply operating rooms with similar geometry and heating load. In one of the operating rooms, standard full ceiling laminar flow ventilation system was used, while in the second one laminar airflow system with auxiliary airflow. For the rooms in question, heat characteristics charts and i-x Molier diagrams with marked thermodynamic changes of purified air are provided. Moreover, the collective specification of energy demand for air purification and transport is presented.