

Warunki poprawnej współpracy węzła ciepłego z układem klimatyzacji bloków operacyjnych szpitala

Conditions for the correct cooperation of the district heating substation with the air conditioning system of the operating blocks in a hospital

KAZIMIERZ ŻARSKI, MARIUSZ KRYŻA

DOI 10.36119/15.2022.3.1

W artykule przedstawiono specyfikę projektowania węzłów ciepłych współpracujących z układem podgrzewania powietrza w systemach klimatyzacji bloków operacyjnych szpitala. Zwrócono uwagę na następujące specyficzne problemy: dobór wymienników ciepła stosownie do bilansu mocy cieplnej w kontekście zastosowania wymienników do odzyskiwania ciepła o wysokiej sprawności w systemie wentylacji i klimatyzacji, dobór elementów węzła ciepłego uwzględniający istotne i szybkie zmiany zapotrzebowania na moc cieplną, zabezpieczenie instalacji podgrzewania powietrza i węzła ciepłego przed skokową zmianą parametrów operacyjnych, dobór właściwego schematu zasilania nagrzewnic i elementów automatycznej regulacji z punktu widzenia zapewnienia precyzji parametrów i z punktu widzenia właściwego funkcjonowania węzła ciepłego, zabezpieczenie instalacji podgrzewania powietrza przed wpływem niskiej temperatury otoczenia. Podano warunki, jakie powinien spełniać nie tylko węzeł ciepły, ale również instalacja podgrzewania powietrza wentylacyjnego.

Słowa kluczowe: klimatyzacja, sala operacyjna, węzeł ciepły, odzyskiwanie ciepła

The article presents the specificity of designing district heating substation (DHS) cooperating with the air heating system in the air conditioning systems of hospital operating blocks. The following specific problems are highlighted: selection of heat exchangers according to the heat power balance in the context of the use of heat exchangers with high-efficiency heat recovery in ventilation and air conditioning systems, selection of the elements of the DHS, taking into account significant and rapid changes in heat power demand, protection of the air heating installation and the DHS against jumps of operating parameters, selection of the correct power supply scheme for heaters and control elements from the point of view of the precision of air parameters and from the point of view of the proper functioning of the DHS, protection of the air heating installation against the influence of low ambient temperature. The conditions that should be met not only by the heat substation, but also by the air conditioning installation are given.

Keywords: air conditioning, operation theatre, district heating substation, heat recovery

Wstęp

Projektowanie wentylacji i klimatyzacji sal operacyjnych w szpitalach wymaga spełnienia szeregu warunków. Kwestią zasadniczą jest utrzymanie czystości powietrza i właściwych warunków mikrobiologicznych, szczególnie w polu operacyjnym. Drugą, również istotną kwestią jest zapewnienie zespołowi operacyjnemu i pacjentowi odpowiednich warunków cieplno-wilgotnościowych, z możliwością dostosowania temperatury powietrza do indywidualnych wymagań lekarzy. Przyjęty w projektowaniu nowych szpitali w Polsce sposób rozdziału powietrza to najczęściej nawiew przez nawiewnik sufitowy z jednokierunkowym przepływem powietrza (nazywany

zazwyczaj, choć nie do końca poprawnie, „laminarnym”) o powierzchni obejmującej strumieniem nawiewanego powietrza obszar ściśle chroniony. Powierzchnia nawiewnika zależy m.in. od rodzaju przeprowadzanych operacji i związanej z tym wielkości obszaru ściśle chronionego (według [5] powierzchnia nawiewnika wynosi dla operacji np. ortopedycznych czy kardiologicznych ok. 3.2x3.2 m) i wywiew przez kratki ściennie umieszczone w dolnej i górnej strefie sali operacyjnej. Nawiew obejmuje stół operacyjny i najbliższe otoczenie, w którym znajduje się zespół operacyjny. Pozostały personel znajduje się poza bezpośrednią strefą nawiewu. Nawiewnik jest umieszczony na wysokości ok. 3 m, a więc droga do głów operatorów to

ok. 1.1-1.3 m. Idea nawiewu laminarnego zakłada brak mieszania (w praktyce występuje niewielka indukcja powietrza z otoczenia), a więc parametry powietrza nawiewanego (temperatura i wilgotność względna) powinny niewiele odbiegać od parametrów wewnętrznych w wyznaczonych granicach. Przyjmuje się, że temperatura powietrza jest niższa od temperatury powietrza w obszarze pracy o 1-3 K, czasami o 0,5 K, zalecana wartość 1K – różnica wynika z konieczności odebrania zysków ciepła przez nawiewane chłodniejsze powietrze. Asymilacja zysków ciepła i wilgoci następuje w dużej mierze poniżej głów zespołu operacyjnego. Można powiedzieć, że nawiewane powietrze bezpośrednio dochodzi do układu oddechowego

dr inż. Kazimierz Żarski – niezależny ekspert HVAC; dr inż. Mariusz Kryża, <https://orcid.org/0000-0002-3819-0896> – Politechnika Bydgoska, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska. Adres do korespondencji/Corresponding Authors: k_zarski@ic.torun.pl, mariusz.kryza@pbs.edu.pl

operatorów. Jest to okoliczność, która zdaniem autora, mocno ogranicza możliwości stosowania recyrkulacji powietrza, głównie ze względu na właściwości organoleptyczne zużytego powietrza (niezależnie od zastosowania AGS – anesthetic gases suction – system odciążu gazów anestetycznych), ale również ze względu na zachowanie mikrobiologicznej czystości nawiewanego powietrza (w przypadku sal operacyjnych oczyszczanie powietrza obiegowego musi być realizowane na dwóch filtrach: co najmniej klasy F7 (ISO PM1 50%) i HEPA klasy minimum H13 np. DIN 1946; według badań uzyskuje się wystarczającą czystość powietrza). Problem jest obecnie dość istotny z powodu zagrożenia wirusem SARS-CoV-2 [3]. Poglądy autorów publikacji dotyczące zasadności zastosowania recyrkulacji powietrza w salach operacyjnych nie są jednoznaczne [1,2]. Zdaniem autora, decyzję o zastosowaniu recyrkulacji powietrza powinni podejmować lekarze, a nie projektanci systemów wentylacji. Problem recyrkulacji powietrza jest problemem „pobocznym” tego artykułu, ale decydującym o bilansie wężła ciepłego. Autorowi znane są rozwiązania projektowe [7], w których autorzy wykazują niemal „zero-energetyczność” systemu, a zastosowane nagrzewnice mają moc tak niewielką, że nie zapewniają równomiernego rozdziału nośnika ciepła, np. nagrzewnica wtórna o mocy ok. 5 kW przy strumieniu powietrza 5500 m³/h. Problemy istotne z punktu widzenia współpracy wężła ciepłego z systemem klimatyzacji bloków operacyjnych to: dobór wymienników ciepła stosownie do bilansu mocy cieplnej w kontekście zastosowania wentylacyjnych wymienników do odzyskiwania ciepła o wysokiej sprawności, dobór elementów wężła ciepłego uwzględniający znaczne i szybkie zmiany zapotrzebowania na moc cieplną, zabezpieczenie instalacji podgrzewania powietrza i wężła ciepłego przed skokową zmianą parametrów operacyjnych, dobór właściwego schematu zasilania nagrzewnic i dobór elementów automatycznej regulacji z punktu widzenia zapewnienia precyzji parametrów i z punktu widzenia właściwego funkcjonowania wężła ciepłego, zabezpieczenie instalacji podgrzewania powietrza przed wpływem niskiej temperatury otoczenia.

Dobór elementów wężła ciepłego uwzględniający znaczne i szybkie zmiany zapotrzebowania na moc cieplną

Dane wejściowe do projektu projektant wężła ciepłego powinien uzyskać od

zamawiającego. Może przyjąć dane od współpracującego projektanta instalacji klimatyzacyjnej i instalacji ciepła do podgrzewania powietrza, o ile jest z nim związany służbowo lub umową cywilno-prawną. Jeśli współpracownik stanowi odrębny podmiot w sensie prawa gospodarczego, wówczas jedynym źródłem danych może być zamawiający związany z projektantem wężła umową o pracę lub umową cywilno-prawną. Obecnie, jak było przy działaniu wielospecjalistycznych biur projektów, nie ma pojęcia: „kompletności dokumentacji”, gdyż system projektowania ma na ogół charakter rozproszony.

Dane do projektu wężła ciepłego zwykle nie są wystarczająco precyzyjne, np. podają wyłącznie zapotrzebowanie na moc cieplną przy maksymalnym obciążeniu i (choć czasem nie) parametry nośnika ciepła. Są to dane **niewystarczające** do prawidłowego zaprojektowania wężła ciepłego.

Do prawidłowego wykonania projektu wężła ciepłego są niezbędne następujące dane [4]:

a. Tabela obciążeń cieplnych Φ w różnej temperaturze powietrza zewnętrznego t_e . Należy pamiętać, że klimatyzacja sal operacyjnych jest klimatyzacją **technologiczną**, a nie klimatyzacją komfortu, w związku z czym należy przyjąć ekstremalne warunki klimatu zewnętrznego ostrzejsze niż w innych obiektach użyteczności publicznej, np. w biurach. Przykładową tabelę podano poniżej.

Tab. 1. Przykładowe zapotrzebowanie na moc cieplną do klimatyzacji przy różnej temperaturze powietrza zewnętrznego

t_e [°C]	Φ [kW]
-24	336.00
-20	255.11
-16	184.18
-12	123.20
-8	72.18
-4	62.22
0	52.27
4	42.31
8	32.36
12	22.40
16	12.44
19	4.98

Wartości w tabeli wynikają ze sprawności temperaturowej odzyskiwania ciepła w różnych przedziałach temperatury powietrza zewnętrznego.

b. Sposób zabezpieczenia wymienników do odzyskiwania ciepła w centralach klimatyzacyjnych przed „zamrożeniem”. Optymalnym rozwiązaniem jest tzw. „płynny bypass”, czyli obejście wymiennika, do którego jest kierowana pewna część ogrze-

wanego powietrza zewnętrznego tak, aby temperatura powierzchni wymiany ciepła nie spadła poniżej 2-3 °C. Do rozwiązań nieprawidłowych należy obejście wymiennika całym strumieniem powietrza lub czasowe wyłączenie układu nawiewnego w centrali w celu „odmrożenia” wymiennika. Ten ostatni sposób jest w salach operacyjnych niedopuszczalny. Autorowi znane są przypadki ostatniego rozwiązania w obiekcie sportowym. Jest oczywiste, że wyłączenie sekcji nawiewu spowoduje zatrzymanie przepływu powietrza w sekcji wywiewu i praktyczny brak możliwości „odmrożenia” powierzchni wymiennika ciepła w układzie powietrznym w rozsądnym czasie.

c. Rodzaj i parametry operacyjne (temperatura zasilania i powrotu) nośnika ciepła, np. GP30 (roztwór glikolu propylenowego o stężeniu 30%), 65/55 °C oraz dyspozycyjna różnica ciśnienia w instalacji.

d. Sposób regulacji mocy nagrzewnic powietrza: zawór dwudrogowy, zawór trójdrogowy, zmieszanie pompowe.

e. Lokalizacja central klimatyzacyjnych: na zewnątrz, w przestrzeni technicznej.

Punkty b,c,d i e zostaną rozwinięte w dalszej części artykułu.

Do dalszych analiz przyjęto blok operacyjny obejmujący 6 sal operacyjnych, w których strumień powietrza klimatyzującego w każdej sali jest równy 7200 m³/h.

Tab. 2. Zapotrzebowanie na moc cieplną Φ i temperatura zasilania t_z w instalacji ogrzewania powietrza przy różnej temperaturze powietrza zewnętrznego t_e przy „płynnym” obejściu wymiennika do odzyskiwania ciepła [8]

t_e [°C]	η_i [%]	Φ [kW]	t_z [°C]
-24	50	296.28	70.0
-22	55	254.80	68.1
-20	60	215.96	66.2
-18	65	179.74	64.2
-16	68	155.91	62.2
-14	72	129.05	60.3
-12	75	108.64	58.3
-10	80	81.64	56.3
-8	80	76.37	54.2
-6	80	71.11	52.2
-4	80	65.84	50.1
-2	80	60.57	48.0
0	80	55.31	45.8
2	80	50.04	43.7
3	80	47.40	42.6
4	80	44.77	41.4
6	80	39.50	39.2
8	80	34.24	36.9
10	80	28.97	34.5
12	80	23.70	32.0
14	80	18.44	29.5
16	80	13.17	26.8
18	80	7.90	23.8
19	80	5.27	22.2

W tabeli 2. i 3. podano zapotrzebowanie na moc cieplną przy różnej temperaturze powietrza zewnętrznego oraz temperaturę zasilania nośnika ciepła w instalacji zasilającej nagrzewnicę powietrza przy „płynnym” obciążeniu wymiennika do odzyskiwania ciepła i przy obciążeniu ON/OFF. Maksymalna sprawność temperaturowa η_{t0} wymiennika jest równa 80%.

Tab. 3. Zapotrzebowanie na moc cieplną Φ i temperatura zasilania t_z w instalacji ogrzewania powietrza przy różnej temperaturze powietrza zewnętrznego t_e przy obciążeniu ON/OFF wymiennika do odzyskiwania ciepła [8]

t_e [°C]	η_t [%]	Φ [kW]	t_z [°C]
-24	0	592.56	70.0
-22	0	566.22	68.1
-20	0	539.89	66.2
-18	0	513.55	64.2
-16	0	487.22	62.2
-14	0	460.88	60.3
-12	0	434.54	58.3
-10	80	81.64	56.3
-8	80	76.37	54.2
-6	80	71.11	52.2
-4	80	65.84	50.1
-2	80	60.57	48.0
0	80	55.31	45.8
2	80	50.04	43.7
3	80	47.40	42.6
4	80	44.77	41.4
6	80	39.50	39.2
8	80	34.24	36.9
10	80	28.97	34.5
12	80	23.70	32.0
14	80	18.44	29.5
16	80	13.17	26.8
18	80	7.90	23.8
19	80	5.27	22.2

W pierwszym przypadku iloraz minimalnej i maksymalnej mocy cieplnej jest równy 0.0178, w drugim 0.0089. Poniżej dokonano doboru wymiennika ciepła w węźle cieplnym w warunkach ekstremalnych i sprawdzono działanie wymiennika w warunkach minimalnego obciążenia w przypadku „płynnego” obciążenia wymiennika do odzyskiwania ciepła [6].

Thermal Input Data

Capacity: 296.3 [kW] Margin: 0.00 %

In temp: 120.0 50.0 [°C]

Out temp: 60.0 70.0 [°C]

Flow: 4233 12780 [kg/h]

Max pr. drop: 20.00 20.00 [kPa]

Water Water

AlfaNova COMFORT range Calculate

Results

#	Description	kW	%	kPa	kPa	Stocked	EUR	Note
1	AlfaNova 76L-30L	296.3	10.0	1.200	8.719	20	4241	

Rys. 1. Wyniki doboru wymiennika ciepła w węźle cieplnym w warunkach obliczeniowych [6]

Thermal Input Data

Capacity: 5.265 [kW] Margin: 0.00 %

In temp: 70.0 21.0 [°C]

Out temp: 21.0 21.4 [°C]

Flow: 92.60 12000 [kg/h]

Water Water

AlfaNova COMFORT range Calculate

AlfaNova Heat Exchanger

Option: Options... All Products Hot Inlet: S4

Picture In/Outlets Temp. profile

Results

#	Description	kW	%	kPa	kPa	Stocked	EUR	Note
1	AlfaNova 76L-30L	5.265	48.0	0.005771	8.419	20	4241	
1	AlfaNova 76L-50H	296.3	208	2.486	19.39	1	5174	
1	AlfaNova 400-40L	296.3	292	0.7943	5.666	20	14151	

Order / Quotation Specification

Description	Qty	Item id
AlfaNova 76L-30L	1	32870 5928 8

FAILED TO FIND A CREDIBLE SOLUTION!
NTU > 10, extreme thermal duty, contact center for advice!

Rys. 2. Wyniki symulacji działania wymiennika ciepła w węźle cieplnym w warunkach minimalnego obciążenia [6]

Iloraz obliczeniowego i minimalnego strumienia masy nośnika ciepła jest równy 45.7, a więc może być przyjęty, gdyż tzw. regulowalność (rangeability) standardowych zaworów to 50. Jest jednak inna przyczyna, dla której spektrum mocy cieplnej nie może być „obstugiwane” przez jeden wymiennik. Mówi o tym komunikat w czerwonej ramce, informujący o przekroczeniu standardowej wartości NTU (number of thermal unit – liczba jednostek wymiany ciepła), co nie zapewnia właściwego funkcjonowania wymiennika ciepła. Wynika to z charakteru wymiany ciepła w wymienniku płytowym. W nominalnych warunkach obciążenia w przykładzie liczba Reynoldsa po stronie pierwotnej (sieci ciepłowniczej) jest równa 3482, w warunkach minimalnego obciążenia: 41.7. Zatem współczynnik przejmowania ciepła po stronie pierwotnej w warunkach minimalnego obciążenia to ok. 20% wartości przy obciążeniu minimalnym. Prędkość wody sieciowej w warunkach nominalnych to 0.1995 m/s, w warunkach minimalnego obciążenia: 0.0044 m/s (4.4 mm/s). Przy tej prędkości warstwa przyścienna nie może być oderwana od powierzchni wymiany ciepła i przekazywanie ciepła

w wodzie sieciowej odbywa się na drodze przewodzenia. Prowadzi to do praktycznego zaniku przekazywania ciepła, co powoduje otwarcie zaworu regulacyjnego do wartości powodującej przepływ większego strumienia nośnika ciepła niż wynika to z bilansu mocy. Konsekwencją tego jest przekroczenie zadanej temperatury zasilania i akcja zamknięcia zaworu regulacyjnego ze skutkiem obniżenia temperatury wody. Te operacje odbywają się przy stopniu otwarcia zaworu ok. 1-2%, a więc w zaworze o nominalnym skoku 19 mm na długości 0.19-0.38 mm. Prowadzi to do „huntingu” zaworu przy dolnym krańcowym położeniu. Należy pamiętać, że systemy zasilania nagrzewnic charakteryzują się minimalną pojemnością, a więc w takim przypadku można spodziewać się niedotrzymania parametrów zasilania instalacji dostarczającej ciepło do nagrzewnic i niedotrzymania parametrów powietrza w pomieszczeniu. Znacznie bardziej drastyczna sytuacja występuje przy dwupołożeniowej (ON/OFF) regulacji obciążenia wymiennika do odzyskiwania ciepła w centrali klimatyzacyjnej: liczba Reynoldsa spada do ok. 0.004 wartości przy nominalnym obciążeniu i wymiana ciepła zupełnie ustaje.

Powyższa analiza prowadzi do wniosku, że w układzie klimatyzacji z zastosowaniem wymiennika odzyskiwania ciepła o wysokiej sprawności temperaturowej należy zaprojektować **dwa wymienniki ciepła**, przełączane w zależności od temperatury powietrza zewnętrznego.

Konieczność zapewnienia właściwej temperatury powietrza nawiewanego do sali operacyjnej wyklucza rozwiązanie z jednym wymiennikiem. W innych obiektach użyteczności publicznej problem

występuje także, ale jego skutki są mniej drastyczne. W tabeli 4 podano przykładowe przyporządkowanie mocy cieplnej do dwóch wymienników.

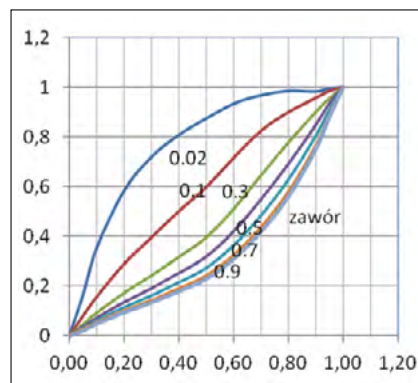
Tab. 4. Przyporządkowanie mocy cieplnej wymiennikom w węźle cieplnym

t_e [°C]	Φ [kW]	Wymiennik
-24	296.28	Wymiennik 1
-22	254.80	
-20	215.96	
-18	179.74	
-16	155.91	
-14	129.05	
-12	108.64	
-10	81.64	
-8	76.37	
-6	71.11	
-4	65.84	
-2	60.57	
0	55.31	
2	50.04	
3	47.40	
4	44.77	
6	39.50	
8	34.24	
10	28.97	
12	23.70	
14	18.44	
16	13.17	
18	7.90	
19	5.27	

Każdy z wymienników ciepła powinien mieć dobrany zawór regulacyjny o odpowiednim autorytecie i o odpowiednich parametrach dynamicznych. Zalecane jest „rozmycie” punktów włączenia, ażeby uniknąć częstego przełączania w dniach o zmieniającej się dynamicznie temperaturze powietrza zewnętrznego. Układ wymaga swobodnie programowalnego regulatora, co wyklucza typowe regulatory stosowane w HVAC. W celu uzyskania płynnej zmiany wymienników, należy w okresach prawdopodobnych przełączeń utrzymywać przepływ wody sieciowej w drugim wymienniku przy minimalnym stopniu otwarcia zaworu regulacyjnego (standby). Funkcje zamykające mogą pełnić zawory regulacyjne. Oczywiście, woda instalacyjna jest przełączana układem zaworu trójdrogowego lub dwóch zaworów ON/OFF.

Zalecane jest stosowanie zaworów regulacyjnych o profilu zbliżonym do wykładniczego. Zapewnia to poprawne działanie zaworu przy autorytecie wyższym niż 0.3. Prędkość przesuwu (właściwie jej odwrotność) trzpienia zaworu nie powinna być większa niż 3 s/mm. Zastosowanie zaworów o parametrach dynamicznych jak do instalacji ogrzewania **jest błędem**.

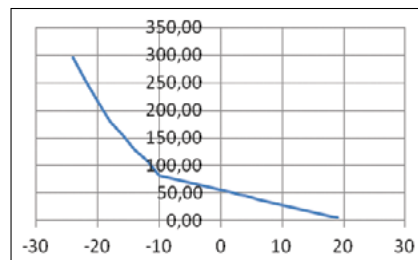
Na rys. 3 podano charakterystykę przepływową zaworu regulacyjnego o profilu wykładniczym w zależności od autorytetu w obwodzie regulowanym [4].



Rys. 3. Zmiana charakterystyki przepływowej zaworu regulacyjnego w zależności od autorytetu (profil wykładniczy) [4]

Zabezpieczenie instalacji podgrzewania powietrza i węzła cieplnego przed skokową zmianą parametrów operacyjnych

Przy projektowaniu wymienników do odzyskiwania ciepła w centralach klimatyzacyjnych z płynną regulacją obciążenia nie występują skokowe, gwałtowne zmiany obciążenia cieplnego. Na rysunku przedstawiono profil mocy cieplnej wymiennika ciepłowniczego w dwóch przypadkach: ciągłego i dwupołożeniowego sterowania obciążeniem wymiennika.



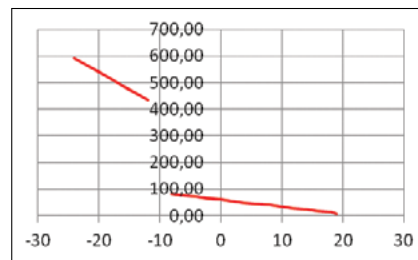
Rys. 4. Profil mocy cieplnej wymiennika ciepłowniczego w przypadku płynnego (po lewej) i dwupołożeniowego (po prawej) sterowania obciążeniem wymiennika do odzyskiwania ciepła [oprac. autora]

Zatem problem skokowej zmiany mocy cieplnej nie dotyczy układu z płynnym obciążeniem wymiennika do odzyskiwania ciepła, a wyłącznie układu ON/OFF. Autorowi są znane przypadki projektowania układów ON/OFF z jednym wymiennikiem ciepła w sekcji klimatyzacji węzła cieplnego. Jeśli nie można zmienić algorytmu regulacji wymiennika do odzyskiwania ciepła, to należy układ zabezpieczyć przed możliwością niedotrzymania temperatury zasilania nośnika ciepła przy przełączaniu trybu działania: z odzyskiwaniem ciepła i bez odzyskiwania ciepła. Przy niewielkiej stałej

czasowej wymiennika ciepła (15-40 s) wystąpi uchyb regulacyjny temperatury nośnika ciepła, mogący spowodować niedopuszczalną zmianę temperatury powietrza nawiewanego do sali operacyjnej. Konieczne jest zastosowanie zaworu regulacyjnego o bardzo dużej szybkości przesuwu trzpienia lub zaworu zamykającego dopływ nośnika ciepła po stronie pierwotnej w przypadku przełączenia z trybu: bez odzyskiwania ciepła → z odzyskiwaniem ciepła. Zawór zamykający chroni przed przegrzaniem, ale nie przed zaniżeniem parametrów nośnika ciepła w układzie zasilania nagrzewnic. Ochrona przed przegrzaniem jest istotna zwłaszcza przy stosowaniu czynników niezamarzających, ale zdaniem autora (patrz pkt *Zabezpieczenie instalacji przed wpływem niskiej temperatury otoczenia*) nie powinny mieć one zastosowania w salach operacyjnych.

W węzłach cieplnych, gdzie występuje niedotrzymanie parametrów powietrza (przypadki znane autorowi), należy poprawić parametry statyczne i dynamiczne zaworów regulacyjnych, a w sytuacjach dalszego niedotrzymania temperatury powietrza zastosować mieszający zbiornik buforowy. Wystarczy pojemność odpowiadająca ok. 20-30 sekundom obliczeniowego strumienia objętości. Zalecany jest zbiornik poziomy.

Jest oczywiste, że w przypadku stosowania dwupołożeniowej regulacji wymiennika do odzyskiwania ciepła tym bardziej powinny być zastosowane dwa wymienniki

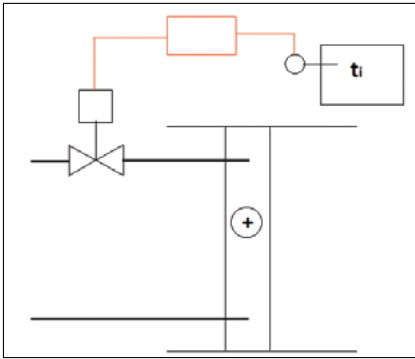


ciepła. Wówczas punkt krytyczny wymiany ciepła nie występuje. Tak więc rozważania dotyczą układu z jednym wymiennikiem.

Prawidłowy sposób projektowania, z płynnym sterowaniem obciążenia wymiennika do odzyskiwania ciepła **eliminuje** zjawisko skokowej zmiany mocy cieplnej.

Dobór właściwego schematu zasilania nagrzewnic powietrza

Istnieją trzy możliwości regulacji temperatury powietrza klimatyzującego, tym samym mocy nagrzewnicy powietrza.



Rys. 5. Regulacja temperatury w pomieszczeniu (w strumieniu nawiewanym) z zaworem dwudrogowym

a. Regulacja za pomocą zaworu dwudrogowego

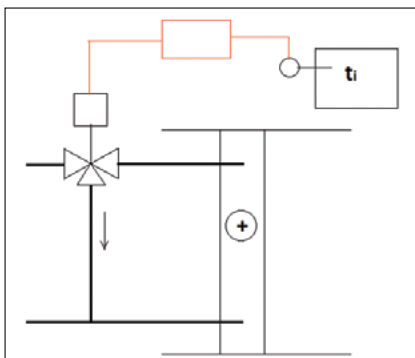
Na rys. 5. pokazano taki sposób regulacji

Jest to regulacja ilościowa. Przymknięcie zaworu powoduje zmianę strumienia nośnika ciepła i, jako skutek wtórny, obniżenie temperatury powrotu. Jest to prawidłowy sposób regulacji, który był unikany w czasach przed wprowadzeniem do stosowania wymienników do odzyskiwania ciepła w układach wentylacyjnych ze względu na niebezpieczeństwo zamarzania dolnych partii nagrzewnic. Obecnie, przy stosowaniu wymiennika do odzyskiwania ciepła, nie ma niebezpieczeństwa spadku temperatury nośnika ciepła poniżej punktu zamarzania. W krytycznym punkcie maksymalnego obciążenia w przykładzie temperatura powietrza przed nagrzewnicą jest równa ok. -3°C , a temperatura powrotu, zgodnie z wykresem regulacyjnym przyjmuje wartość ok. $40-50^{\circ}\text{C}$. Powyżej temperatury powietrza zewnętrznego -16°C temperatura powietrza po operacji odzyskiwania ciepła jest dodatnia.

Rozległe układy wymagają zastosowania regulatorów różnicy ciśnienia lub (przynajmniej) zaworów równoważących.

b. Regulacja za pomocą zaworu trójdrogowego rozdzielającego

Ten sposób regulacji pokazano na rys. 6.



Rys. 6. Regulacja temperatury w pomieszczeniu (w strumieniu nawiewanym) z zaworem trójdrogowym

To jest również regulacja ilościowa, przy czym strumień nośnika ciepła płynący między wymiennikiem ciepłowniczym a zaworem trójdrogowym jest w przybliżeniu stały. Jest to system korzystny z punktu widzenia regulacji nagrzewnicy powietrza, ale niekorzystny z punktu widzenia obiegu nagrzewnicy podwyższa temperaturę wody powracającej do sieci ciepłowniczej, co jest zjawiskiem niekorzystnym. Szczególnie drastycznie zjawisko to występuje przy projektowaniu sekcji klimatyzacji z jednym wymiennikiem w punkcie przełączania układu odzyskiwania ciepła. Przykładowo przy danych jak w tabeli 3. w temperaturze powietrza zewnętrznego -10°C temperatura wody powrotnej jest równa ok. 55°C , zatem temperatura wody powracającej do sieci ciepłowniczej wynosi ok. $57-58^{\circ}\text{C}$. Przy niskiej temperaturze zasilania nagrzewnic powietrza, np. $60/50^{\circ}\text{C}$, ten sposób regulacji może mieć zastosowanie.

Obiegiem nagrzewnicy ma mniejszy opór przepływu niż obwód nagrzewnicy, stąd wskazane jest zastosowanie zaworu o zróżnicowanym współczynniku przepływu lub zamontowanie w obiegu nagrzewnicy zaworu równoważącego.

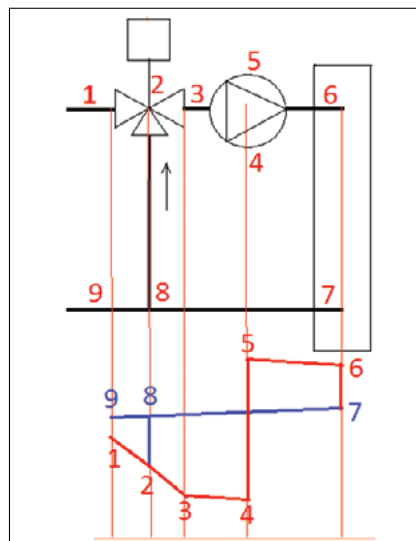
c. Regulacja za pomocą układu mieszania

Ten sposób regulacji z pompą zainstalowaną w przewodzie zasilającym jest dość często stosowany przez projektantów. Ilustruje go rys. 7, na którym również pokazano układ ciśnienia w przewodach.

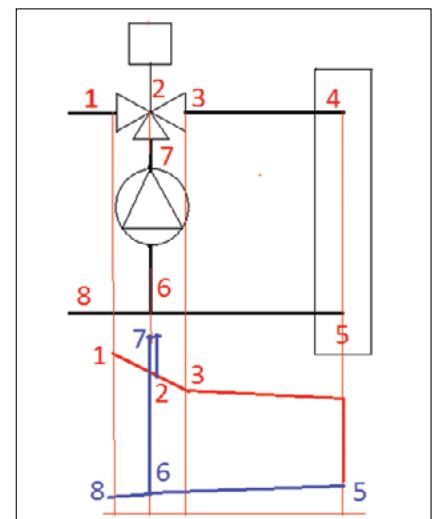
Jest to regulacja jakościowa: przy stałym przepływie przez nagrzewnicę regulowana jest temperatura nośnika ciepła zasilającego nagrzewnicę. Niestety, układ

pokazany na rys. 7. nie ma podstaw do prawidłowego działania w złożonych, a zwłaszcza w rozległych systemach, a zwłaszcza do doprowadzenia ciepła do nagrzewnic. Wynika to ze specyficznego układu ciśnienia, który jest wymagany przy tym schemacie połączenia. Prawidłowe działanie układu zmieszania z pompą w przewodzie zasilającym wymaga inwersji ciśnienia, co widać na rys. 7. Jeżeli w miejscu włączenia obwodu nagrzewnicy w przewodzie zasilającym będzie panować ciśnienie większe niż w przewodzie powrotnym (wytworzone przez pompę przy wymienniku ciepła), wówczas w przewodzie mieszającym nastąpi przepływ odwrotny. Do nagrzewnicy będzie dopływać nośnik ciepła o niezmięnionej temperaturze. Układ regulacji „zanotuje” zbyt wysoką temperaturę powietrza, wysle zatem sygnał otwarcia do zaworu trójdrogowego, co przy pełnym otwarciu spowoduje zanik przepływu w przewodzie doprowadzającym nośnik ciepła z wymiennika ciepłowniczego. Zmniejszy się temperatura powietrza i wówczas zawór zacznie się otwierać, by po chwili zaczął się zamykać z powodu zbyt wysokiej temperatury powietrza. Kolejny przypadek „polowania”, tym razem w zaworze regulacyjnym nagrzewnicy. Jest zastanawiające, dlaczego projektanci uporczywie stosują ten schemat połączenia. Autorowi są znane dane z monitoringu potwierdzające brak mieszania nośnika zasilającego z powrotnym. Umieszczenie pompy w przewodzie powrotnym również wymaga inwersji ciśnienia [4].

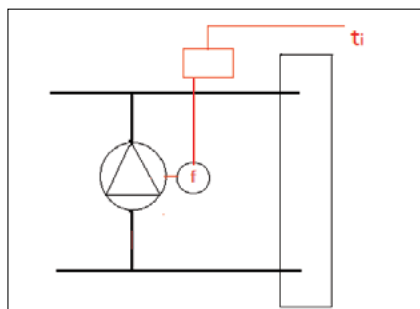
Układ mieszania pompowego jest prawidłowy, gdy pompa jest zamontowana w przewodzie mieszającym., co ilustruje rys. 8.



Rys. 7. Regulacja temperatury w pomieszczeniu (w strumieniu nawiewanym) za pomocą mieszania pompowego



Rys. 8. Regulacja temperatury w pomieszczeniu (w strumieniu nawiewanym) za pomocą mieszania pompowego z pompą w przewodzie mieszającym – układ ciśnienia



Rys. 9.
Regulacja temperatury w pomieszczeniu za pomocą zmieszania pompowego z pompą w przewodzie mieszającym

Zawór regulacyjny jest w tym schemacie zbędny, wystarczy regulacja prędkości obrotowej pompy za pomocą przemiennika częstotliwości (falownika). Przy odpowiednio niskiej prędkości obrotowej pompa nie będzie mogła pokonać ciśnienia różnicowego między przewodem zasilającym i powrotnym i przepływ w przewodzie mieszającym zaniknie. Układ taki pokazano na rys. 9.

Zdaniem autora najbardziej korzystny układ regulacji temperatury w układzie klimatyzacji sal operacyjnych to układ z zaworem dwudrogowym z zastosowaniem zaworu równoważącego lub zaworu regulacji różnicy ciśnienia.

Zabezpieczenie instalacji podgrzewania powietrza przed wpływem niskiej temperatury otoczenia

Z praktyki autora wynika pogląd o niestosowaniu czynników niezamarzających (roztworu glikolu propylenowego lub glikolu etylenowego) w układach klimatyzacji sal operacyjnych. Glikol etylenowy jest trujący i palny, glikol propylenowy nie ma tych cech, ale nie jest substancją obojętną. Trudno sobie wyobrazić konsekwencje wycieku roztworu glikolu w nagrzewnicy centrali klimatyzacyjnej szpitala, zwłaszcza sali operacyjnej, szczególnie podczas operacji i zabiegów. Wyciek wody jest też możliwy, ale można go zauważyć przez zanotowanie w układzie regulacyjnym wzrostu wilgotności względnej powietrza nawiewanego i można przełączyć układ na centralę rezerwową. Systemy szpitalne, zwłaszcza systemy klimatyzacji sal operacyjnych wymagają rezerwowych central, będących w stanie czuwania, z utrzymaniem lub z szybkim przelączeniem przepływu nośnika ciepła i chłodu. Nie zawsze projektanci mają taką świadomość, a chęć ograniczenia kosztów inwestycji przez inwestorów nie znajduje zrozumienia dla niezbędnej redundancji. Częste przeglądy zmniejszają ryzyko awarii, ale jej całkiem

nie eliminują. Zdaniem autora woda powinna być jedynym nośnikiem ciepła (także chłodu, choć to nie należy do tematu artykułu). Konsekwencją zastosowania wody bez domieszek w systemach ogrzewania powietrza jest konieczność umieszczenia central klimatyzacyjnych w ogrzewanej przestrzeni technicznej. Nie istnieje skuteczne zabezpieczenie nagrzewnicy przed zamrożeniem w niej wody, jeśli centrala będzie zamontowana na zewnątrz budynku. Autor z niepokojem obserwuje ten trend w projektowaniu szpitali [7]. Można zabezpieczyć przewody doprowadzające wodę przez zastosowanie elektrycznych przewodów grzejnych, ale nie ma możliwości zabezpieczenia wnętrza nagrzewnicy.

Podsumowanie

Artykuł porusza wybrane aspekty projektowania systemów HVAC w blokach operacyjnych z punktu widzenia prawidłowej współpracy układów klimatyzacyjnych z węzłem cieplnym. Elementem łączącym są instalacje ogrzewania powietrza klimatyzującego, które powinny spełniać określone standardy, aby umożliwić prawidłowe funkcjonowanie węzła cieplnego. Jak wykazuje praktyka, większość sytuacji nieprawidłowego funkcjonowania systemów ogrzewania powietrza jest „przenoszona” w sensie odpowiedzialności na projektanta węzła cieplnego. Niespełnienie pewnych standardów przez system klimatyzacji i instalacji towarzyszących uniemożliwia prawidłowe zaprojektowanie i funkcjonowanie węzła cieplnego.

Punktami krytycznymi w projektowaniu instalacji podgrzewania powietrza w systemach klimatyzacji i projektowania węzła cieplnego współpracującego z tą instalacją są:

- Uzyskanie od zamawiającego prawidłowych danych bilansu cieplnego: tabeli zapotrzebowania na moc cieplną w różnej temperaturze powietrza zewnętrznego, parametrów operacyjnych instalacji i informacji o algorytmie regulacji wymienników do odzyskiwania ciepła w centralach klimatyzacyjnych.
- Właściwy dobór wymienników w węzle cieplnym przy stosowaniu wymienników do odzyskiwania ciepła wentylacyjnego o wysokiej sprawności (powyżej 50%) – powinny być stosowane 2 wymienniki pokrywające spektrum zapotrzebowania na moc cieplną. Zastosowanie jednego wymiennika prowadzi do nieprawidłowego funkcjonowania płytowych wymienników ciepła.

- Właściwe przyjęcie ekstremalnych warunków klimatu zewnętrznego, ostrzejszych niż w klimatyzacji komfortu.
 - Przyjęcie algorytmu regulacji obejścia wymiennika do odzyskiwania ciepła jako „płynnego by-passu”, co zapewni uniknięcie skokowej zmiany mocy cieplnej i związanej z tym możliwości niedotrzymania parametrów regulacyjnych przygotowanego powietrza.
 - Przyjęcie wysokiego autorytetu zaworów regulacyjnych w obwodach wentylacji, co pozwala na prawidłowe funkcjonowanie wymiennika w obszarze niskiego obciążenia cieplnego.
 - Przyjęcie odpowiednich parametrów dynamicznych zaworów regulacyjnych, co pozwala na uniknięcie uchybu regulacji temperatury nośnika zasilającego instalację.
 - Zastosowanie właściwego sposobu regulacji nagrzewnic klimatyzacyjnych: układu z zaworem dwudrogowym lub układu zmieszania z pompą w przewodzie mieszającym.
 - Przyjęcie odpowiedniego miejsca montażu central klimatyzacyjnych: w ogrzewanej przestrzeni technicznej, a nie na zewnątrz budynku, co pozwala na zastosowanie wody jako bezpiecznego nośnika ciepła w systemach projektowania klimatyzacji sal operacyjnych.
- Spełnienie tych warunków zapewni właściwą współpracę węzła cieplnego i systemu klimatyzacji. Jakikolwiek „konflikt” w zbiorze punktów krytycznych uniemożliwi prawidłową współpracę instalacji, tym samym nie zapewni właściwych warunków mikroklimatu sal operacyjnych szpitala.

LITERATURA

- [1] Charkowska A: *Systemy wentylacji i klimatyzacji w szpitalach – dostępne rozwiązania, optymalizacja kosztów*, dlaszpitali.pl, dostęp 02.2022.
- [2] Kaiser K.: *Eksploatacja filtrów do oczyszczania powietrza w instalacjach klimatyzacji i wentylacji*, TChiK 9/2010
- [3] Szałański P., Cepiński W.: *Prawdopodobieństwo przenoszenia wirusa SARS-CoV-2 w pomieszczeniach wentylowanych*, INSTAL 2/2022; DOI 10.36119/15.2022.2.5.
- [4] Żarski K.: *Węzły cieplne w miejskich systemach ciepłowniczych*, Ośrodek Informacji „Technika instalacyjna w budownictwie”, Warszawa 2014
- [5] Dokument HTM 01-03:2021, *Specialised ventilation for healthcare premises Part A: The concept, design, specification, installation and acceptance testing of healthcare ventilation systems*
- [6] CAS200 – program doboru wymienników ciepła, AlfaLaval
- [7] Projekt instalacji ogrzewania powietrza w systemie klimatyzacji bloku operacyjnego szpitala w....(dane w posiadaniu autora)
- [8] Program do wyznaczania wykresu regulacyjnego w instalacji ogrzewania – oprac. autora