

Marta OLESZKO¹
Vyacheslav PISAREV²

ANALIZA SYSTEMU WENTYLACJI Z RECYRKULACJĄ POWIETRZA ORAZ KRZYŻOWYM WYMIENNIKIEM CIEPŁA W OKRESIE ZIMOWYM

Celem pracy jest opracowanie metody projektowania systemu wentylacji wraz z dwustopniowym odzyskiem ciepła z zastosowaniem recykulacji powietrza oraz krzyżowego wymiennika ciepła. Głównym problemem obliczeniowym pracy, było określenie na wykresie i-x powietrza wilgotnego, stanu powietrza uzyskanego w wyniku mieszania się strumieni powietrza świeżego i recykulowanego. Trudność ta wynikała z zaproponowanej kolejności elementów centrali wentylacyjnej. Zróżnicowanie elementów polegało na występowaniu krzyżowego wymiennika ciepła po komorze mieszania. W analizowanej metodzie powietrze wywiewane przepływa przez krzyżowy wymiennik ciepła gdzie się ochładza, a następnie dzieli na dwa strumienie – powietrza wywiewanego i recykulowanego. Kolejno strumień obiegowy przepływa przez przepustnicę powietrza recykulowanego i trafia do komory mieszania, Łączy się tam z powietrzem świeżym i przepływa do rekuperatora. W wymienniku ciepła następuje przekazanie ciepła strumieniowi nawiewanemu, odzyskanego ze strumienia wywiewanego. W opracowaniu przy bardzo niskich temperaturach zewnętrznych możliwe jest zastosowanie nagrzewnicy wstępnej w celu podgrzania powietrza zewnętrznego. Zaletą przedstawianego rozwiązania jest to, że przed rekuperatorem powietrze recykulowane miesza się ze świeżym. W wyniku przeprowadzonej analizy obliczeniowej stwierdzono, że przedstawiona metoda z mieszaniem powietrza świeżego i recykulowanego przed krzyżowym wymiennikiem ciepła może być wykorzystana przez przyszłych projektantów instalacji wentylacyjnych.

Słowa kluczowe: odzysk ciepła, centrala wentylacyjna, komora mieszania, wykresy i-x powietrza wilgotnego

1. Centrale wentylacyjne z dwustopniowym odzyskiem ciepła

Stan powietrza w budynkach użyteczności publicznej charakteryzuje się temperaturą, wilgotnością, prędkością powietrza, a nawet stopniem zanieczyszczenia. W zależności od ich przeznaczenia rozbieżności między różnymi parametrami

¹ Autor do korespondencji / corresponding author: Marta Oleszko, tel. 880896676; martaoleszko@gmail.com

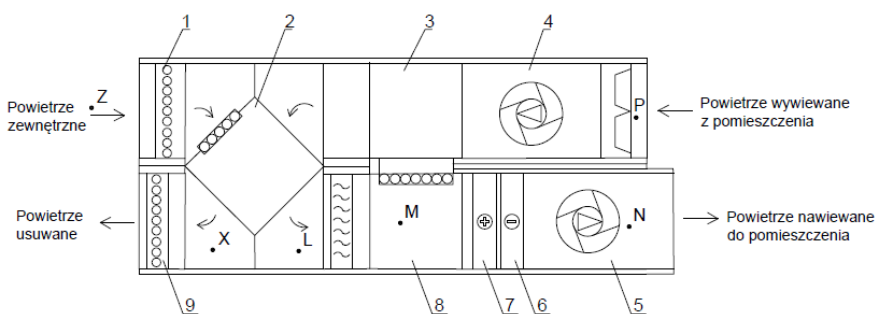
² Vyacheslav Pisarev, Politechnika Rzeszowska, Zakład Ciepłownictwa i Klimatyzacji, Al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów; tel. 178651946; pisarev@prz.edu.pl

powietrza są bardzo duże. Stosowane w tych pomieszczeniach centrale wentylacyjne muszą utrzymać stan powietrza zgodny z Polskimi Normami. Odzysk ciepła z wywiewanego powietrza zapewnia ekonomię energii oraz komfort cieplny osób przebywającym w pomieszczeniu. Należy jednak pamiętać, że odczuwane parametry powietrza tj. wilgotność, czystość czy temperatura są cechami indywidualnymi. Ich otrzymanie wymaga optymalnego doboru nie tylko rodzaju czy wielkości centrali wentylacyjnej ale również i występujących w niej rekuperatorów [1].

Celem publikacji jest analiza metody projektowania systemu wentylacji wraz z dwustopniowym odzyskiem ciepła z zastosowaniem recyrkulacji powietrza oraz krzyżowego wymiennika ciepła. W branży instalacyjnej wyróżnia się wiele firm, które w swojej ofercie mają centrale wentylacyjne z dwustopniowym odzyskiem ciepła w formie recyrkulacji i krzyżowego wymiennika ciepła. Ich cechą charakterystyczną jest występowanie odzysku ciepła poprzez zastosowanie krzyżowego wymiennika ciepła w centrali przed recyrkulacją (rys. 1, 2) [2, 3].

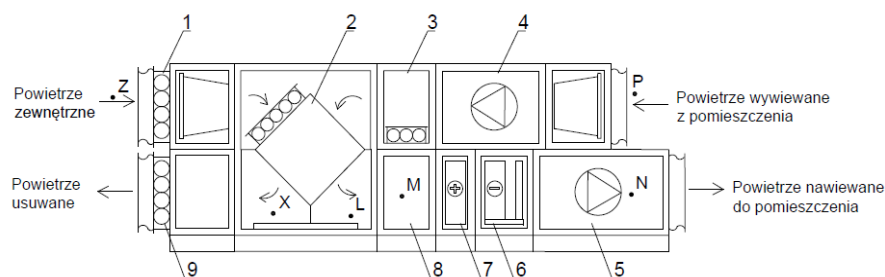
Punkty stanu powietrza Z, N, X, M, P, L na rys. 1, 2 odpowiadają punktom stanu powietrza na wykresie i-x powietrza wilgotnego (rys. 3).

Na rysunku 3 zaznaczono następujące procesy: ZL - przejście powietrza zewnętrznego przez krzyżowy wymiennik ciepła (2), LP - zmieszanie powietrza świeżego z powietrzem recyrkulowanym, MN - ogrzanie powietrza poprzez nagrzewnicę (7), NP- zmiana stanu powietrza w pomieszczeniu, PX- zmiana stanu powietrza wywiewanego w krzyżowym wymienniku ciepła (2). Punkt M określa stan powietrza po wymieszaniu w komorze mieszania (8) powietrza recyrkulowanego z powietrzem zewnętrznym.



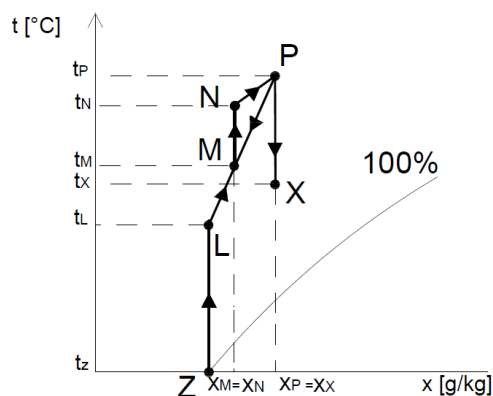
Rys. 1. Centrala wentylacyjna firmy VTSClima z recyrkulacją powietrza i krzyżowym wymiennikiem ciepła, na podstawie [2]; 1 – przepustnica powietrza zewnętrznego, 2 – krzyżowy wymiennik ciepła, 3 – komora z przepustnicą powietrza recyrkulowanego, 4 – wentylator wywiewny, 5 – wentylator nawiewny, 6 – chłodnica, 7 – nagrzewnica, 8 – komora mieszania, 9 – przepustnica powietrza usuwanego

Fig. 1. VTSClima air handling unit with air recirculation and cross-flow heat exchanger, based on [2]; 1 – air damper outside, 2 – cross-flow heat exchanger 3 – chamber with recirculated air damper, 4 – exhaust fan, 5 – supply air fan, 6 – cooler, 7 – heater, 8 – mixing chamber, 9 – extract air damper



Rys. 2. Centrala wentylacyjna firmy Clima Gold z recyrkulacją powietrza i krzyżowym wymiennikiem ciepła, na podstawie [3]. Opis zgodny z rys. 1

Fig. 2. Clima Gold air handling unit with air recirculation and cross-flow heat exchanger, based on [3]. Description of the figure is consistent with Fig. 1

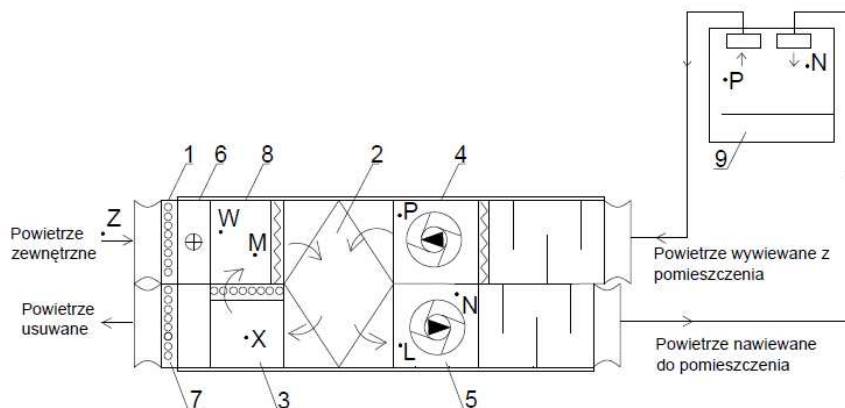


Rys. 3. Przebieg zmian stanu powietrza na wykresie i-x powietrza wilgotnego w okresie zimowym

Fig. 3. The process of changes in the air quality in winter on the graph i-x of the moist air

W pracy zaproponowano nowe rozwiązanie centrali wentylacyjnej polegającej na odzysku ciepła przez zastosowanie recyrkulacji powietrza przed krzyżowym wymiennikiem ciepła (rys. 4).

Punkty stanu powietrza Z, W, M, L, N, P, X na rys. 4, odpowiadają punktom stanu powietrza na wykresie i-x powietrza wilgotnego (rys. 5). Powietrze wywiewane przepływa przez krzyżowy wymiennik ciepła (2, rys. 4) gdzie następuje jego ochłodzenie. Następnie powietrze jest dzielone na dwa strumienie (strumień powietrza wywiewanego oraz strumień powietrza recyrkulowanego) w zależności od panujących warunków wewnętrznych i zewnętrznych. Strumień obiegowy, przepływa przez przepustnicę powietrza recyrkulowanego i trafia do komory mieszania (8). Tutaj następuje mieszanie powietrza świeżego z recyrkulowanym, a później skierowanie go do rekuperatora (2). W urządzeniu następuje przekazanie ciepła strumieniowi nawiewanemu odzyskanego ze strumienia wywiewanego. W opracowaniu przy bardzo niskich temperaturach zewnętrznych



Rys. 4. Centrala wentylacyjna z recyrkulacją powietrza wewnętrznego i krzyżowym wymiennikiem ciepła, pracująca w okresie zimowym. Opis elementów na rys. 4: 1÷5 zgodny z rys. 1, 6 – nagrzewnica wstępna, 7 – przepustnica powietrza wywiewanego, 8 – komora mieszania, 9 – wentylowane pomieszczenie

Fig. 4. Functioning of the air handling unit with indoor air recirculation and cross-flow heat exchanger in winter. Description of the elements in the drawing no 4: 1÷5 in line with the drawing no 1, 6 – preheater, 7 – extract air damper, 8 – mixing chamber, 9 – ventilated room

możliwe jest zastosowanie nagrzewnicy wstępnej (6) w celu podgrzania powietrza zewnętrznego. Zaletą przedstawianego rozwiązania jest to, że przed rekupe ratorem powietrze recyrkulowane miesza się ze świeżym. Wskutek tego powietrze nawiewane na krzyżowy wymiennik ciepła w naszym przypadku nie trzeba dodatkowo podgrzewać nagrzewnicą pomocniczą (6 rys. 4) eliminując tym samym przypadek zamarznięcia wymiennika.

2. Zasady projektowania zmian stanu powietrza w systemach wentylacyjnych z dwustopniowym odzyskiem ciepła

Głównym problemem obliczeniowym jest określenie stanu powietrza uzyskanego w wyniku mieszania się strumieni powietrza świeżego i recyrkulowanego na wykresie i-x powietrza wilgotnego (punkt M, rys. 5). Trudność ta wynika z zaproponowanej kolejności elementów centrali wentylacyjnej. Zróżnicowanie polega na występowaniu krzyżowego wymiennika ciepła po komorze mieszania. W literaturze i katalogach firm nie przedstawiono przykładowej metody projektowania procesów uzdatniania powietrza dla tego typu ułożenia elementów układu. Pominięcie tak istotnej analizy może zniechęcić przyszłych projektantów i eksploataatorów do zastosowania takiego rozwiązania.

Dane wejściowe (okres zimowy)

- Parametry powietrza zewnętrznego wg [4]: temperatura zewnętrzna - t_z [°C], zawartość wilgoci - x_z [g/kg];
- Parametry powietrza wewnętrznego wg [5]: temperatura w pomieszczeniu - t_p [°C];
- Parametry technologiczne: założona liczba osób - n [os], zyski ciepła całkowitego - Q_c [kW], zyski wilgoci - W [kg/s], całkowity strumień powietrza określony w okresie letnim - V_c [m³/h], strumień powietrza recyrkulowanego - V_{rec} [m³/h], wymagany strumień powietrza zewnętrznego uwzględniający ilość osób - V_{san} [m³/h] ($V_{san} + V_{rec} = V_c$).

Projektowanie procesów obróbki powietrza w systemie wentylacji z recyrkulacją powietrza wywiewanego oraz krzyżowym wymiennikiem ciepła pracującego w okresie zimowym (rys. 4), rozpoczynamy od zaznaczenia stanu powietrza zewnętrznego – punkt Z (ϕ_z, t_z) na (rys. 5) zgodnie z danymi wejściowymi. Następnie określamy położenie punktu P. Zawartość wilgoci w pomieszczeniu obliczamy na podstawie wzoru:

$$x_p = x_z + W / (V_{san} \cdot \rho) \text{ [g/ kg]} \quad (1)$$

gdzie: ρ – gęstość powietrza [kg/m³].

Na przecięciu linii zawartości wilgoci x_p i temperatury t_p wyznaczamy stan powietrza w pomieszczeniu określony punktem P (rys. 5).

Współczynnik kierunkowy procesu uzdatniania powietrza w pomieszczeniu obliczamy ze wzoru:

$$\varepsilon = Q_c / W \text{ [kJ/kg]} \quad (2)$$

Jako wariant możemy obliczyć moc nagrzewnicy wstępnej (6, rys. 4), która przez ogrzanie powietrza zewnętrznego zapobiega zamarznięciu krzyżowego wymiennika ciepła (2, rys. 4):

$$Q_N = V_{san} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (t_w - t_z) \text{ [kW]} \quad (3)$$

gdzie: c_p – pojemność cieplna właściwa powietrza przy stałym ciśnieniu [kJ/(kg · °C)], t_w -temperatura uzyskana po zastosowaniu nagrzewnicy wstępnej (punkt W, rys. 5), można ją przyjąć w granicach $t_w = 0 \div -5^\circ\text{C}$.

Zakładamy współczynnik sprawności krzyżowego wymiennika ciepła η_t na podstawie danych katalogowych. Wartość ta jest zależna od różnicy temperatur między strumieniami powietrza, ich udziałów oraz wilgotności.

Stan powietrza uzyskany w wyniku mieszania strumieni powietrza świeżego i recyrkulowanego (punkt M rys. 5) określamy stosując metodę kolejnych przybliżeń, wynikającej z porównania wiadomych wzorów [6]:

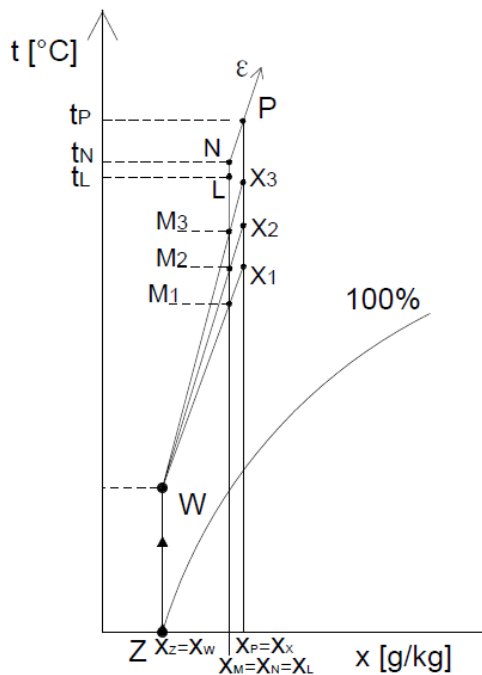
$$t_L - t_M = \eta_t \cdot (t_p - t_M) \quad (4)$$

$$t_P - t_X = t_L - t_M \quad (5)$$

gdzie: t_L – temperatura powietrza nawiewanego po przejściu przez wymiennik ciepła - punkt L, t_M - temperatura powietrza nawiewanego przed wymiennikiem (temperatura punktu mieszania M), t_P – temperatura powietrza wywiewanego przed wymiennikiem (temperatura powietrza wewnętrznego punkt P), t_X - temperatura powietrza wywiewanego po przejściu przez wymiennik ciepła, punkt X. Po przekształceniach podstawiamy temperaturę powietrza nawiewanego po przejściu przez krzyżowy wymiennik ciepła t_L ze wzoru(5) do (4) otrzymując równanie:

$$-t_M \eta_t + (\eta_t - 1) t_P = -t_X \quad (6)$$

Wzór (6) ma dwie niewiadome temperatury t_M i t_X . Ich poszukiwanie odbywa się poprzez założenie jednego parametru, następnie określenie drugiego z wykresu i-x powietrza wilgotnego i sprawdzenie równania (6). Zgodnie z przyjętą kolejnością do wzoru (6) podstawiamy wartości temperatur punktów M i X (rys. 5) powstających po przecięciu się założonej temperatury t_X ($x_X = x_P = = \text{const}$) oraz punktu W.



Rys. 5. Przebieg zmian stanu powietrza wentylacyjnego na wykresie i-x powietrza wilgotnego obrazujący kolejne przybliżenia punktu mieszania powietrza zewnętrznego i recykulowanego, a także powietrza po wymienniku krzyżowym.

Fig. 5. The process of changes in the condition of the ventilation air on the graph i-x of the moist air, illustrating further approximation of the point of mixing the outdoor air with the recirculated air and the air after flowing through cross-flow heat exchanger

Opisane czynność wyznaczania dokładnego położenia punktu M należy powtórzyć, aż do uzyskania zgodności warunku ze wzoru (6). Mając dany punkt M, odczytujemy dla niego parametry stanu powietrza. Temperaturę t_M wstawia-

my do przekształconego wzoru (5) otrzymując temperaturę dla punktu L przedstawiającego stan powietrza po krzyżowym wymienniku ciepła.

Wyznaczenie położenia punktu L dokonujemy poprzez przecięcie się linii zawartości wilgoci $x_M = \text{const}$ i wyliczonej temperatury t_L .

Parametry powietrza nawiewanego punkt N wyznaczamy na przecięciu się linii zawartości wilgoci x_M ($x_M = x_N = \text{const}$) oraz prostej kierunkowej $\varepsilon = \text{const}$ przechodzącej przez punkt P. Jeżeli punkt L leży poniżej punktu N należy po krzyżowym wymienniku ciepła zastosować nagrzewnicę pomocniczą.

Przykład

Dane wejściowe (okres zimowy)

- Parametry powietrza zewnętrznego wg [4]: temperatura zewnętrzna - $t_z = -20^\circ\text{C}$, zawartość wilgoci - $x_z = 0,8 \text{ g/kg}$;
- Parametry powietrza wewnętrznego wg [5]: temperatura w pomieszczeniu - $t_p = 20^\circ\text{C}$;
- Parametry technologiczne: założona liczba osób - 60 os, zyski ciepła całkowitego - $Q_c = 14,76 \text{ kW}$, zyski wilgoci - $W = 3,18 \text{ kg/h} = 8,83 \cdot 10^{-4} \text{ kg/s}$, całkowity strumień powietrza określony w okresie letnim - $V_c = 7380 \text{ m}^3/\text{h}$, wymagany strumień powietrza zewnętrznego - $V_{\text{san}} = 1800 \text{ m}^3/\text{h}$, strumień powietrza recyrkulowanego - $V_{\text{rec}} = 5580 \text{ m}^3/\text{h}$.

Projektowanie procesów obróbki powietrza rozpoczynamy od zaznaczenia na wykresie i-x powietrza wilgotnego stanu powietrza zewnętrznego - punkt Z (rys. 6), zgodnie z danymi wyjściowymi. Kolejno zgodnie ze wzorem (1) obliczamy zawartość wilgoci w pomieszczeniu:

$$x_p = 0,8 \text{ g/kg} + ((3,18 \text{ kg/h}) / (1800 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 1,2 \text{ kg/m}^3)) \cdot 1000 = 2,27 \text{ g/kg}$$

Następnie na przecięciu linii zawartości wilgoci $x_p = 2,27 \text{ g/kg}$ i temperatury $t_p = 20 \cdot ^\circ\text{C}$ wyznaczamy stan powietrza w pomieszczeniu (punkt P rys. 6).

Określenie współczynnika kierunkowego procesu uzdatniania powietrza w pomieszczeniu dokonano na podstawie równania (2):

$$\varepsilon = (10,58 \text{ kW} \cdot 3600) / 3,18 \text{ kg/h} = 11977 \text{ kJ/kg}$$

Jako możliwy wariant, określono moc nagrzewnicy wstępnej (6, rys. 4) zgodnie ze wzorem (3):

$$Q_n = 0,5 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 1,2 \text{ kg/m}^3 \cdot 1 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}) \cdot (0^\circ\text{C} - (-20^\circ\text{C})) = 12 \text{ kW}$$

Założenie wymaganej sprawności krzyżowego wymiennika ciepła dokonano na podstawie katalogu firmy VTS Clima [2]. Przyjęto sprawność krzyżowego wymiennika ciepła na poziomie $\eta_t = 52\%$. Stosując metodę kolejnych przybliżeń, wynikającej z porównania wiadomych wzorów (4) i (5), określamy stan powietrza uzyskany w wyniku mieszania strumieni powietrza świeżego i recyrkulowanego (punkt M rys. 6). Do wzoru (6) podstawiamy wartości temperatur

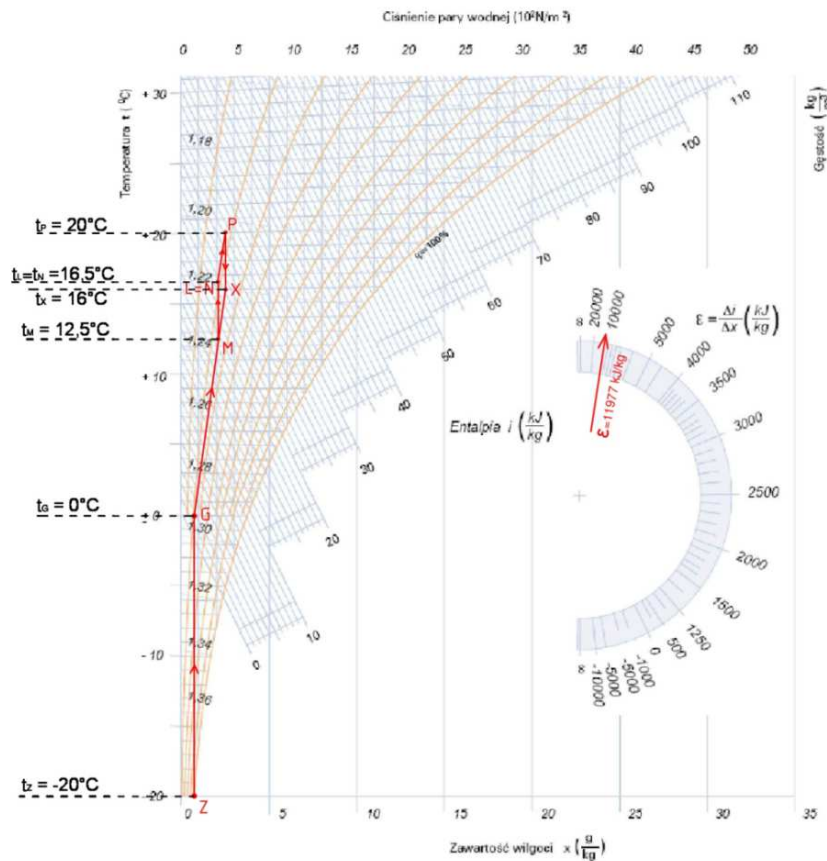
punktów X i M ($t_X = 16^\circ\text{C}$ i $t_M = 12,5^\circ\text{C}$) powstających po przecięciu się założonej temperatury t_X ($x_X = x_P = \text{const}$) oraz punktu W i sprawdzamy zgodność obu stron równania:

$$-12,5^\circ\text{C} \cdot 0,52 + (0,52 - 1) \cdot 20^\circ\text{C} = -t_X$$

$$-16^\circ\text{C} = -16^\circ\text{C}$$

Mając daną temperaturę w punkcie M, z wykresu i-x powietrza wilgotnego (rys. 6) odczytujemy dla niego parametry stanu powietrza. Następnie z przekształconego wzoru (5) obliczamy temperaturę dla punktu L:

$$t_L = 20^\circ\text{C} + 12,5^\circ\text{C} - 16^\circ\text{C} = 16,5^\circ\text{C}$$



Rys. 6. Przebieg zmian stanu powietrza wentylacyjnego na wykresie i-x powietrza wilgotnego w okresie zimowym z nagrzewnicą pomocniczą, recykulacją powietrza wewnętrznego i zastosowaniem krzyżowego wymiennika ciepła

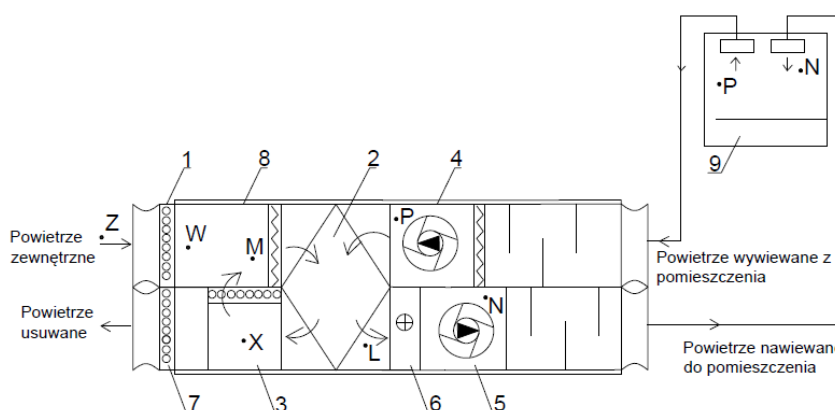
Fig. 6. The process of changes in the condition of the ventilation air in winter on the graph i-x of the moist air, with supplementary heating coil, indoor air recirculation and the use of cross-flow heat exchanger

Określenie położenia punktu L dokonujemy poprzez przecięcie linii zawartości wilgoci $x_M = 1,91$ g/kg oraz temperatury $t_L = 16,5^\circ\text{C}$.

Parametry powietrza nawiewanego (punkt N rys. 6) wyznaczamy na przecięciu się linii zawartości wilgoci $x_M = 1,91$ g/kg ($x_M = x_N$) oraz prostej kierunkowej $\varepsilon = 11977$ kJ/kg przechodzącej przez punkt P. W omawianym przykładzie punkt L pokrywa się z punktem N.

3. Wnioski

Zaproponowano instalację systemu wentylacji z recykulacją powietrza oraz krzyżowym wymiennikiem ciepła po komorze mieszania w okresie zimowym z opracowaniem metody projektowej i przykładem obliczeniowym. Wskutek wysokiej temperatury w punkcie M w większości przypadków, centrale wentylacyjne mogą być bez nagrzewnicy wstępnej. Taki układ zaproponowano na (rys. 7). Nagrzewnica pomocnicza (6. rys. 7) może być montowana po krzyżowym wymienniku ciepła, na powietrzu przepływającym do pomieszczenia.



Rys. 7. Centrala wentylacyjna z recykulacją powietrza wewnętrznego i krzyżowym wymiennikiem ciepła, pracująca w okresie zimowym. Opis elementów na rys. 7: 1÷5 – zgodny z rys. 1, 6 – nagrzewnica pomocnicza, 7 – przepustnica powietrza wywiewanego, 8 – komora mieszania, 9 – wentylowane pomieszczenie

Fig. 7. Functioning of the air handling unit with indoor air recirculation and cross-flow heat exchanger in winter. Description of the elements in the drawing no 7: 1÷5 in line with the drawing no 1, 6 – auxiliary heater, 7 – extract air damper, 8 – mixing chamber, 9 – ventilated room

Punkty stanu powietrza na Z, W, M, L, N, P, X na (rys. 7), odpowiadają punktom stanu powietrza na wykresie i-x powietrza wilgotnego (rys. 6).

W wyniku przeprowadzonej analizy obliczeniowej stwierdzono, że przedstawiona metoda z mieszaniem powietrza świeżego i recykulowanego przed

krzyżowym wymiennikiem ciepła może być wykorzystana przez przyszłych projektantów instalacji wentylacyjnych.

Literatura

- [1] <http://www.chlodnictwoiklimatyzacja.pl/artykuly/> (z dn. 28.02.2016).
- [2] <http://vtsgroup.pl/VENTUS.html> (z dn. 28.02.2016).
- [3] <http://climagold.com/wp-content/uploads/2015/12/clima-gold-katalog-2011pdf-5845.pdf>(z dn. 28.02.2016).
- [4] PN-76/B-03420: Wentylacja i klimatyzacja. Parametry obliczeniowe powietrza zewnętrznego.
- [5] PN-76/B-03421: Wentylacja i klimatyzacja. Parametry obliczeniowe powietrza wewnętrznego w pomieszczeniach przeznaczonych do stałego przebywania ludzi.
- [6] V. Pisarev, Projektowanie instalacji wentylacji i klimatyzacji z rekuperacją ciepła, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2012.

ANALYSIS OF THE USE OF VENTILATION SYSTEM WITH AIR RECIRCULATION AND CROSS-FLOW HEAT EXCHANGER IN WINTER

Summary

The aim of the study is to analyze the method of designing ventilation systems with a two-stage heat recovery using air recirculation and cross-flow heat exchanger. The major computational problem in this work was presenting on the graph i-x the moist air, the quality of the air obtained by mixing fresh airstreams with recirculated airstreams. This difficulty resulted from the proposed arrangement of the air handling unit components. Diversity of the elements involved the presence of cross-flow heat exchanger after the mixing chamber. In the analyzed method, the exhausted air flows through the cross-flow heat exchanger where it cools and then divides into two airstreams - the exhaust airstream and the recirculated airstream. Then, the circulating airstream passes through the air recirculation damper and goes to the mixing chamber. There, it mixes with the fresh air and flows into the recuperator. In the heat exchanger, the heat recovered from the exhaust air is transferred to the supply airstream. In the study, at low outside temperatures, a pre-heating coil may be used in order to heat the outside air. The benefit of the provided solution is the fact that outside the recuperator, the recirculated air is mixed with the fresh air. As a result of the conducted computational analysis, it was found that the presented method based on mixing the fresh and recirculated air before flowing into cross-flow heat exchanger can be used by future designers of ventilation systems.

Keywords: heat recovery, air handling unit, mixing chamber, graph i-x of the moist air

Przesłano do redakcji: 2.06.2017 r.

Przyjęto do druku: 30.06.2017 r.