

# Wizualizacyjna metoda oceny szronienia chłodnicy powietrza

Visualisation method for assessment of frost formation on air cooler

PAWEŁ JAKOŃCZUK, JERZY GAGAN, KAMIL ŚMIERCIEW, DARIUSZ BUTRYMOWICZ

DOI 10.36119/15.2020.5.2

Wymienniki ciepła z ożebrowanymi rurami są szeroko stosowane w ogrzewnictwie, wentylacji, klimatyzacji i chłodnictwie. W przypadku wymienników pracujących jako chłodnice powietrza dochodzi do szronienia, które na ogół silnie pogarsza efektywność wymiany ciepła, poprzez wytworzenie dodatkowego oporu cieplnego i wywołanie strat ciśnienia. W artykule przedstawiono analizę wpływu szronienia na pracę chłodnicy powietrza przy pomocy zaproponowanej przez autorów metody wykorzystującej zsynchronizowane z pomiarami wielkości cieplno-przepływowych fotografie powierzchni wymiany ciepła. Na podstawie długoterminowych badań wymiennika pracującego w chłodni sprawdzono wpływ szronienia m. in. na wydajność chłodniczą, współczynnik obejścia i opór termiczny. W analizowanym przypadku szronienie zmniejszyło wydajność chłodniczą nawet o 40%.

*Słowa kluczowe: chłodnictwo, chłodnica powietrza, szronienie, degradacja termiczna, metoda wizualizacyjna, wymiana ciepła*

Finned tube heat exchangers are widely used in heating, ventilation, air conditioning and refrigeration. In the case of exchangers operating as air coolers, frost formation occurs, which generally strongly deteriorates the efficiency of heat transfer by creating additional thermal resistance and causing additional pressure loss. The paper provides with the analysis of the effect of frosting process on the operation of the air cooler using the method proposed by the authors using observations synchronised with thermal measurements of air cooler. On the basis of long-term tests of the air cooler operating in the vegetables cold storage chamber the influence of frosting process was assessed, among others on cooling capacity, bypass factor, and thermal resistance. In the analysed case, frosting reduced the cooling capacity by up to 40%.

*Keywords: refrigeration, air cooler, frosting, thermal degradation, visualization method, heat transfer*

## Wstęp

Szronienie powierzchni wymiany ciepła jest zjawiskiem niepożądanym, ponieważ warstwa szronu działa jak dodatkowy opór termiczny zmniejszający efektywność wymiany ciepła. Proces formowania szronu jest skomplikowany [1], więc jego dokładne poznanie oraz ocena degradacji wymiany ciepła może być traktowana wciąż jako otwarty problem badawczy. W pracy [2] przedstawiono podstawową klasyfikację mechanizmu szronienia i podzielono ten proces na trzy okresy: (I) okres wzrostu kryształów, (II), okres przyrostu warstwy szronu, (III) okres pełnego przyrostu. W pierwszym okresie powierzchnię chłodnicy pokrywa cienka warstwa szronu i następuje przyrastanie kryształków lodu, w drugiej - rośnie gęstość i grubość warstwy wywołana przez tworzenie się cienkich kryształów w górnej warstwie i dyfuzję pary wodnej w głąb porowatej warstwy szronu. W trzecim okresie następuje naprzemiennie topnienie i zamrażanie

wody w chwili, gdy temperatura warstwy osiąga 0°C, który to proces kończy się, gdy osiągnięty zostaje punkt równowagi. Zamrażanie topniejącego lodu zachodzące w tym okresie w głębszych partiach warstwy szronu zwiększa jego gęstość i zmniejsza jego opór termiczny.

Dotychczas opracowano wiele teoretycznych modeli procesu szronienia dla prostych geometrii. W pracy [3] przedstawiono klasyczny model przewidujący gęstość i grubość warstwy szronu na powierzchniach płaskich. W pracy [3] wykazano, że obniżenie temperatury powierzchni i wzrost wilgotności względnej powietrza przyspiesza formowanie się szronu. W pracy [5] zaprezentowano półempiryczną korelację na przewodność cieplną szronu dla porowatości w zakresie od 0,50 do 0,95 i temperatur ścianki od -30°C do -4°C. Równania zostały porównane z korelacjami opracowanymi wcześniej i okazały się dokładniejsze. W pracy [6] opublikowano uogólniony, prosty model szronienia płaskiej płyty,

zaproponowano też zmodyfikowane równanie na początkową gęstość szronu, bazujące na korelacji zaczerpniętej z pracy [2] oraz formuły opisujące temperaturę powierzchni szronu, gęstość strumienia ciepła oraz grubość i gęstość warstwy szronu. W pracy [15] opublikowano z kolei bardziej uogólnione korelacje na właściwości szronu. W publikacji [6] omówiono badania przyrostu i zagęszczania szronu w kanałach zbudowanych z równoległych płyt i zaproponowano na tej podstawie półempiryczną korelację na gęstość szronu. W pracy [7] wykorzystano sztuczne sieci neuronowe do przewidywania grubości i gęstości szronu dla poziomo ustawionego cylindra w warunkach konwekcji naturalnej, uzyskując wysoką jakość predykcji efektów procesu szronienia.

Szronienie wymienników z ożebrowanymi rurami również było przedmiotem zainteresowania wielu badaczy. W pracy [8] autorzy opracowali korelacje na grubość, gęstość i przewodność warstwy szronu oraz straty ciśnienia powietrza dla

mgr inż. Paweł Jakończuk, <https://orcid.org/0000-0002-9529-0906>; dr hab. inż. Jerzy Gagan, <https://orcid.org/0000-0002-7607-9654>; dr hab. inż., prof. PB Kamil Śmierciew, <https://orcid.org/0000-0001-6482-770X>, prof. dr hab.inż. Dariusz Butrymowicz, <https://orcid.org/0000-0003-3869-8347> - Politechnika Białostocka, Katedra Techniki Ciepłej, Adres do korespondencji/Corresponding author: d.butrymowicz@pb.edu.pl

zaszronionego wymiennika ciepła. W pracy [9] opisano badania szronienia wymienników z ożebrowanymi rurami w warunkach naturalnej konwekcji dla średnich temperatur czynnika chłodniczego  $-20^{\circ}\text{C}$ ,  $-15^{\circ}\text{C}$  i  $-10^{\circ}\text{C}$ , temperatur otoczenia między  $20^{\circ}\text{C}$  i  $30^{\circ}\text{C}$  oraz wilgotności powietrza między 50% a 70%. Autorzy artykułu zaobserwowali, że przepływ powietrza między kompaktowymi żebrami jest pomijalny, ponieważ szron formuje się jedynie na krawędziach żeber, zaś rurki chłodnicy powietrza pozostają nieoszronione. W artykule [10] na podstawie eksperymentalnych badań wymiennika z ożebrowanymi rurami stwierdzono, że zmniejszenie przepływu powietrza i zwiększenie wilgotności względnej - sprzyjają tworzeniu się szronu, zaś rozstaw żeber ma mały wpływ na proces szronienia, jeśli jest on odpowiednio duży.

W [11] opracowano półempiryczny model niejednorodnego szronienia wymiennika z ożebrowanymi rurami, dodatkowo uwzględniający niejednorodność dystrybucji powietrza przepływającego przez chłodnicę. Autorzy stwierdzili, że nieuwzględnienie niejednorodności dystrybucji powietrza powoduje powstanie dużych błędów w obliczeniach wydajności chłodniczej wymiennika i grubości szronu, sięgających nawet od 20 do 50%. W pracy [12] zbadano wpływ rozstawu żeber, wlotowych temperatur powietrza i czynnika chłodniczego, przepływu powietrza i wilgotności względnej na szronienie wymienników ze spiralnie ożebrowanymi rurami i stwierdzono dominujący wpływ wilgotności powietrza na szronienie. Z kolei w pracy [13] autorzy badali szronienie i odszranianie wymienników z ożebrowanymi rurami o różnych charakterystykach powierzchni: z warstwą hydrofilową, superhydrofobową i bez żadnej powłoki. Masa i grubość szronu na powierzchni superhydrofobowej były o 28,8% i 17,1% niższe niż na wymienniku bez powłoki. Pokrycie hydrofobowe znacząco zmniejszyło zużycie energii na odszranianie i jego czas, również odpływ wody ze stopionego lodu był szybszy.

Jak wynika z powyższego przeglądu literatury – podejmowane są liczne zagadnienia badawcze w zakresie rozpoznania własności szronu oraz kinetyki jego powstawania uwarunkowanej wszystkimi niemal parametrami pracy chłodnicy powietrza oraz geometrią tego wymiennika. Z aplikacyjnego punktu widzenia za kluczowy aspekt należy jednakże uznać degradację wymiany ciepła wywołanej procesem szronienia. Zagadnieniu temu poświęcono artykuł opublikowany wcześniej w tym czasopi-

śmie [16]. W tym artykule dokonano oceny degradacji wymiany ciepła bazując na długoterminowych wynikach badań chłodnicy powietrza w warunkach jej pracy w przechowalni warzyw. Osobnym problemem jest rozpoznanie możliwości oceny degradacji termicznej na podstawie badań wizualizacyjnych chłodnicy powietrza prowadzonych w warunkach przechowalnich. Jest rzeczą zrozumiałą, że badania wizualizacyjne nie są w stanie oddać struktury szronu oraz innych uwarunkowań procesu wymiany ciepła na powierzchni oszronionej chłodnicy. Można jednakże postulować, biorąc pod uwagę dotychczas prowadzone badania, że z upływem czasu - wraz z rozwojem procesu szronienia oraz stopnia oszronienia chłodnicy – proces degradacji rozwija się w sposób proporcjonalny do tempa procesu oszronienia powierzchni wymiany ciepła. Rezultat taki może być użyteczny do procesu identyfikacji pracy chłodnic powietrza oraz sterowania nimi. W niniejszym artykule podejmuje się zatem wstępną ocenę, czy istnieje wzajemna korelacja pomiędzy procesem degradacji wydajności cieplnej chłodnicy powietrza a zaszronieniem części jej powierzchni ocenianym wizualnie. W artykule tym zaprezentowano metodę identyfikacji ilości szronu na powierzchni chłodnic powietrza przy pomocy obserwacji wymiennika. Metoda ta została sprawdzona na danych pomiarowych zebranych podczas badań chłodnicy pracującej w komorze chłodniczej używanej do przechowywania warzyw.

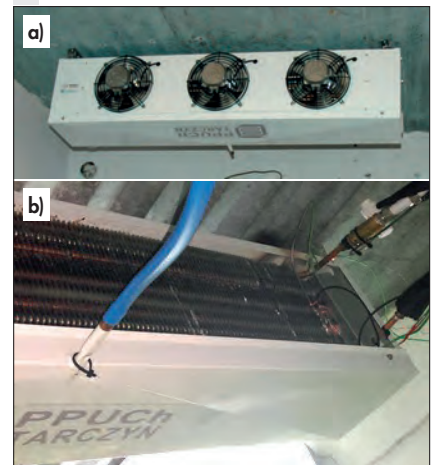
### Badania chłodnicy powietrza i procedura pomiarowa

Badana chłodnica pracowała w komorze chłodniczej używanej do przechowywania warzyw. Wymiennik o nominalnej

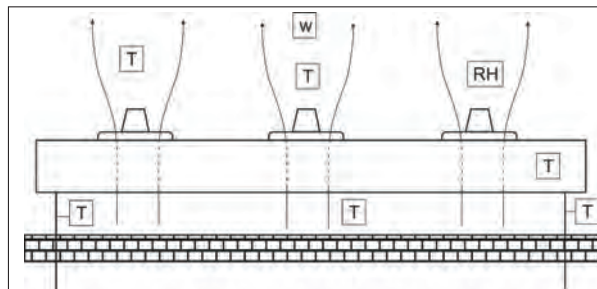
mocy 1,148 kW działał w obiegu pośrednim z roztworem glikolu. Przepływ powietrza wymuszały trzy cichobieżne wentylatory o średnicy 200 mm i poborze mocy 10 W każdy, przy nominalnym przepływie powietrza 1105 m<sup>3</sup>/h. Chłodnica zbudowana była z 18 miedzianych rur ze 149 aluminiowymi żebrami, tworzących 9 obiegów. Wymiary żeber wynosiły 202x90x0,25 mm, a rozstaw 7 mm. Wymiennik wyposażony był w dwie grzałki elektryczne stosowane do jego rozmrażania. Powierzchnia wymiany ciepła chłodnicy wynosiła 5,7 m<sup>2</sup>, nominalny spadek ciśnienia powietrza wynosił 6 Pa. Badany wymiennik ukazano na rys. 1.

Rozmieszczenie czujników pokazano na rys. 2, zaś fotografię pokazującą rozmieszczenie czujników temperatury powietrza wlotowego i temperatury żeber przedstawiono na rys. 3. Podczas badań mierzono następujące wielkości:

Rys. 1. Fotografie badanej chłodnicy: a) strona wylotowa powietrza; b) strona wlotowa powietrza  
Fig. 1. Photographs of the tested air cooler: a) air inlet side; b) air outlet side.



Rys. 2. Rozmieszczenie czujników na chłodnicy  
Fig. 2. Arrangement of the measurement probes in the air cooler



Rys. 3. Rozmieszczenie czujników temperatury: a) temperatury wlotowej powietrza; b) temperatury żeber chłodnicy  
Fig. 3. Arrangement of temperature measurement probes: a) for inlet air temperature; b) for the fins temperature.

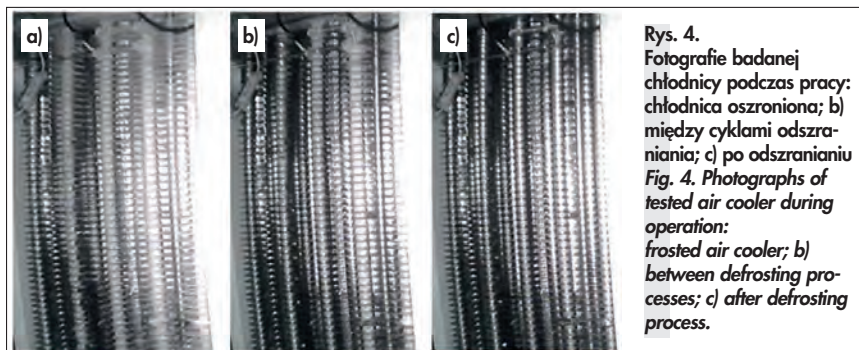
- prędkość i temperatura powietrza wylotowego;
- temperatura powietrza wlotowego (rys. 3a);
- wlotowa i wylotowa temperatura glikolu;
- temperatura żeber (rys. 3b).

Prędkość powietrza mierzono przy pomocy wielokierunkowej sondy Delta Ohm HD103t o zakresie 0-5 m/s oraz dokładności  $\pm 0,04$  m/s dla 0-1,0 m/s i  $\pm 0,2$  m/s dla 1-5 m/s. Temperaturę powietrza mierzono termoparami CZAKI 361K-3-W3. Odszranianie, które trwało 10 minut, przeprowadzono dwa razy na dobę. Proces szronienia badanej chłodnicy został zobrazowany na rys. 4.

### Metoda oceny procesu degradacji wymiany ciepła spowodowanej szronieniem

Proponowana metoda oceny szronienia opiera się na wizualizacji badanej chłodnicy w rzeczywistych warunkach pracy, tj. w komorze chłodniczej. Procedura wymaga wykonania obserwacji wymiennika wykonywanych kamerą, które są zsynchronizowane z pomiarami wielkości cieplno-przepływowych podczas pracy. Obserwacje wymiennika zapisywane były w postaci plików wideo, więc konieczne było wyodrębnienie obrazów, kadrowanie i konwersja do skali szarości. Ilość szronu określono, zliczając piksele reprezentujące szron na fotografiach przy pomocy algorytmu zbudowanego w NI Vision Builder 2013, elementu środowiska NI LabView. Poniżej w syntetyczny sposób zostało opisane funkcjonowanie opracowanego narzędzia do analizy przyrostu szronienia.

W pierwszym etapie analizy należało wykonać konwersję plików ze standardu, w jakim zostały zapisane przez oprogramowanie kamery – ciągi obrazów „avi” do obrazów poklatkowych w standardzie fotograficznym. Następnie przeprowadzono konwersję z trybu RGB na tryb 256 odcieni szarości. Kolejnym krokiem było określenie jakiego zakresowi odcieni szarości w uzyskanych obrazach odpowiada szron. Przeprowadzono znaczną liczbę prób polegających na próbkowaniu obrazu dla określenia odpowiedniego zakresu odcieni szarości, który można było przypisać jako odpowiadające szronowi powstającemu na powierzchni wymiennika. Przeanalizowano kilkadziesiąt godzin materiału, gdzie kolejne obrazy były rejestrowane w jednosekundowych odstępach. Taka ilość materiału pozwoliła na wiarygodną weryfikację działania zaproponowanego algorytmu pod względem powtarzalności



Rys. 4. Fotografie badanej chłodnicy podczas pracy: chłodnica oszroniona; b) między cyklami odszraniania; c) po odszranianiu  
Fig. 4. Photographs of tested air cooler during operation: frosted air cooler; b) between defrosting processes; c) after defrosting process.

odnośnie do oceny ilościowej analizowanego materiału.

Przygotowany w Vision Builder algorytm inspekcji składa się z trzech kroków. Pierwszym etapem jest pobranie przygotowanego wcześniej zdjęcia. Następnie program zlicza piksele w kolorze szronu i zapisuje wyniki w pliku tekstowym. W drugim etapie inspekcji (Count Pixels) określana jest ilość szronu na powierzchni chłodnicy. W kroku tym program zlicza piksele w kolorach mieszczących się w zadanym zakresie. Ponieważ opcja ta działa tylko na obrazach w skali szarości, konieczna była wcześniejsza konwersja zdjęć z formatu RGB, w którym zostały zarejestrowane przez kamerę.

Zakres uwzględnianych wartości pikseli można ustalić ręcznie lub automatycznie, według różnych metod. Na potrzeby analizy użyto opcji Gray Objects z ręcznie ustalonymi progami barw pikseli. Kluczową kwestią jest prawidłowy dobór zakresu kolorów odpowiadających szronowi. Zakres ten wybrano na podstawie obserwacji zdjęć chłodnicy w różnych stopniach oszronienia. Ostatecznie ustalono, że wartości kolorów najlepiej reprezentujące szron zawierają się między 90 a 170 bitów. Niebieski obszar widoczny na rys. 5 to wszystkie punkty mieszczące się w tym zakresie. Wyraźnie widać różnicę między wymiennikiem oszronionym i czystym, jest to podstawa wybranej metody analizy.

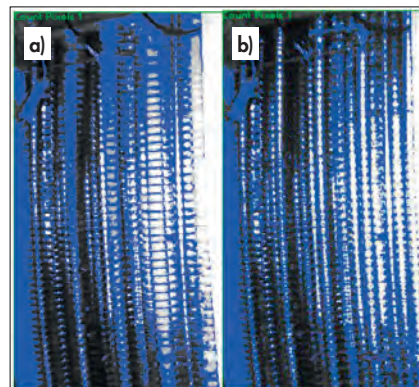
Wydajność chłodnicza badanego  $\dot{Q}_c$  wymiennika, współczynnik obejścia  $BF$  i zmiany oporu cieplnego po szronieniu  $\Delta R_{fr}$  obliczono według następujących zależności:

$$\dot{Q}_c = \dot{V}_g r_g c_g (t_{g,out} - t_{g,in}) \quad (1)$$

$$BF = \frac{t_2 - t_s}{t_1 - t_s} \quad (2)$$

$$\Delta R_{fr} = \frac{1}{k - k_{fr}} \quad (3)$$

Spadek wydajności chłodniczej obliczono wg wzoru:



Rys. 5. Obróbkę fotografie chłodnicy: a) przed odszranianiem; b) po odszranianiu  
Fig. 5. Processed photographs of the air cooler before defrosting process; b) after defrosting process.

$$\Delta \dot{Q}_c = \frac{\dot{Q}_c - \dot{Q}_{c,fr}}{\dot{Q}_c} \quad (4)$$

Współczynnik przenikania ciepła obliczono z zależności:

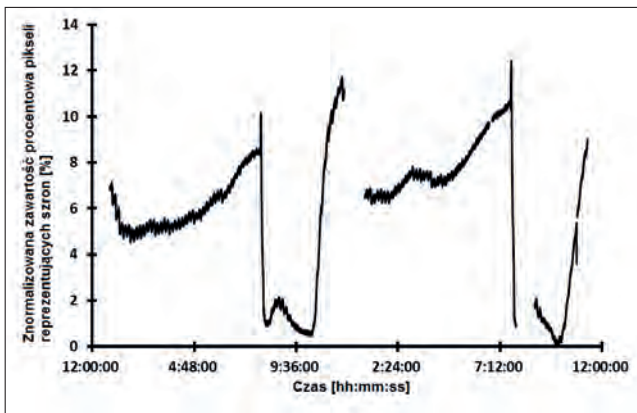
$$k = \frac{\dot{Q}_c}{A_c \cdot \Delta T_m} \quad (5)$$

gdzie  $A_c$  jest polem powierzchni wymiany ciepła, a  $\Delta T_m$  to logarytmiczna średnia różnica temperatur:

$$\Delta T_m = \frac{(t_{in,fr} - t_{out,g,fr}) + (t_{out,fr} - t_{in,g,fr})}{\ln \left( \frac{t_{in,fr} - t_{out,g,fr}}{t_{out,fr} - t_{in,g,fr}} \right)} \quad (6)$$

### Wyniki analizy

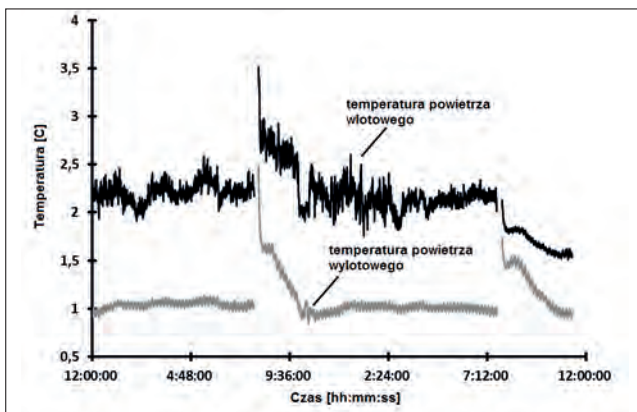
Badana chłodnica powietrza pracowała w komorze chłodniczej podczas długoterminowego składowania kapusty pekińskiej [14, 15]. Przeanalizowano cztery serie pomiarowe (w artykule przedstawiono wykresy dla jednej przykładowej serii). Oprócz porównania wybranych wielkości mierzonych z poziomem oszronienia obliczono również wydajność chłodniczą wymiennika, opór cieplny i współczynnik obejścia. Poziom



Rys. 6.

Wykres stopnia oszronienia chłodnicy w czasie

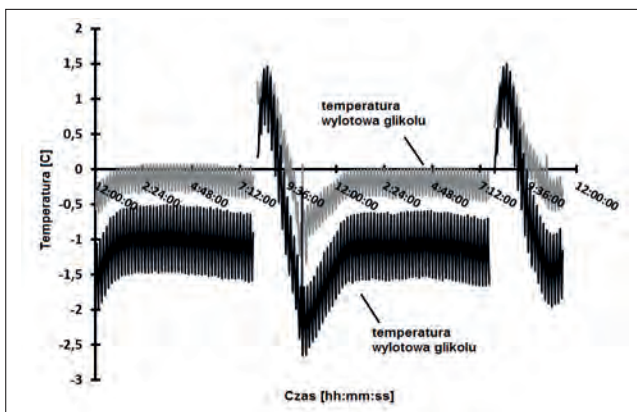
Fig. 6. Presentation of assessed frost formation level at the tested air cooler with time.



Rys. 7.

Zmiany temperatury powietrza w czasie pracy chłodnicy

Fig. 7. Air temperature variation during operations of air cooler



Rys. 8.

Zmiany temperatury glikolu w czasie pracy chłodnicy

Fig. 8. Glycol temperature variation during operation of the air cooler.

oszronienia oraz temperatury powietrza i glikolu pokazano na rys. 6, 7 oraz 8. Dane zebrane podczas odszraniania zostały usunięte z wykresów, ponieważ większość parametrów, zwłaszcza temperatury powietrza i glikolu, osiągała wysokie wartości, co zmniejszało czytelność wykresów.

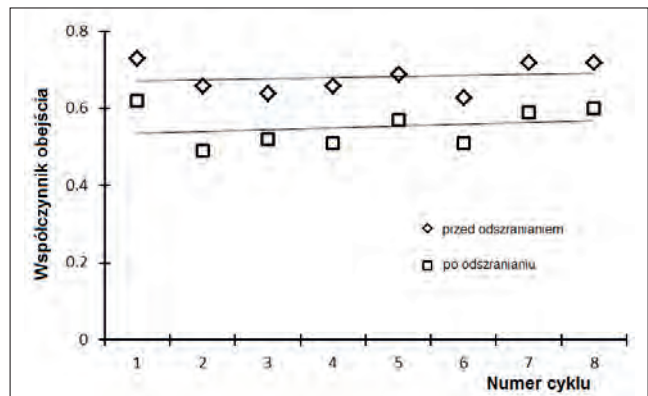
Chłodnicę rozmrażano co 12 godzin. Jej powierzchnia nie pokrywała się szronem równomiernie między kolejnymi cyklami odszraniania, co widoczne jest na rys. 6. Procentowa zawartość pikseli o odcieniach szarości 90 – 170, ustalonych jako reprezentujących szron na zdjęciach, mieściła się w zakresie 32 – 50%. Dla każdej serii pomiarowej odjęto najniższą wartość procentową od zawartości obliczonej dla każdego zdjęcia. Przyjęto, że to minimum wyznacza moment, kiedy powierzchnia chłodnicy była całkowicie czysta.

Procentowe zawartości zwrócone przez NI Vision Builder oznaczają liczbę pikseli mieszczących się w wybranym zakresie od 90. do 170. odcienia szarości na całym zdjęciu. Jest to pomiar pośredni, proporcjonalny do ilości szronu na powierzchni chłodnicy. Zero procent (rys. 6) oznacza moment, w którym wymiennik jest czysty (nieoszroniony). Z kolei 100% nie oznacza, że chłodnica jest całkowicie zasazoniona, ponieważ niewielką część kadru zajmują inne elementy, np. obudowa wymiennika. Części te uwzględniono podczas analizy i nie wpływają one na wyniki.

W pierwszej połowie serii pomiarowej proces szronienia przebiega podobnie jak w innych seriach (rys. 6). Początek wykresu przedstawia etap po drugim odszranianiu poprzedniego dnia. Chłodnica stopniowo pokrywa się szronem aż do pierwszego cyklu odładzania o godzinie 8:00 rano. Po usunięciu lodu następuje szybkie ponowne szronienie i niemal równomierny przyrost ilości lodu do drugiego cyklu odszraniania. Skoki wartości na rys 6, widoczne na samym początku procesów odładzania, zostały na samym początku procesów odładzania wywołane przez zmiany struktury powierzchni szronu. Powietrze ogrzewane przez grzałki elektryczne podczas rozmrażania wymiennika najpierw topiło kryształki lodu na zewnętrznej powierzchni warstwy szronu, co spowodowało zmianę jej struktury i chwilowy wzrost zawartości pikseli mieszczących się w zakresie odcieni reprezentujących szron. Zjawisko to również nie wpłynęło jednak na wyniki analizy.

Temperatura powietrza (rys. 7) przed chłodnicą lekko rośnie wraz z przyrostem ilości szronu. Temperatura za chłodnicą zachowuje się odwrotnie. Zmiany te są niewielkie, rzędu dziesiątej części stopnia. Temperatury glikolu (rys. 8) zmniejszają się nieco wraz ze szronieniem wymiennika.

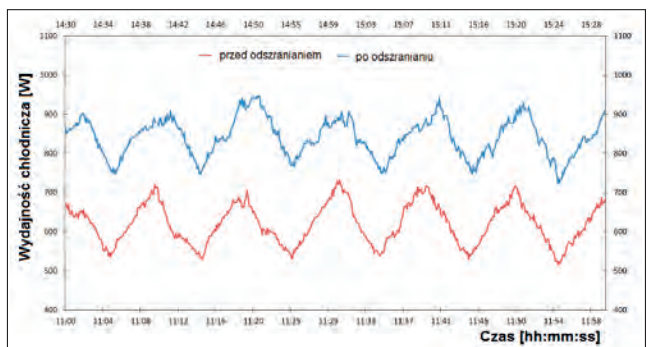
Wydatność chłodnicza przed i po odszranianiu zmieniała się w zakresie od 0,75 kW do 0,90 kW (rys. 10). Najniższa obliczona wartość to 0,35 kW, a najwyższa to 1,20 kW. Zmniejszenie wydajności chłodniczej wywołane szronieniem w dłuższym okresie



Rys. 9.

Współczynnik obejścia przed i po odszranianiu w kolejnych cyklach

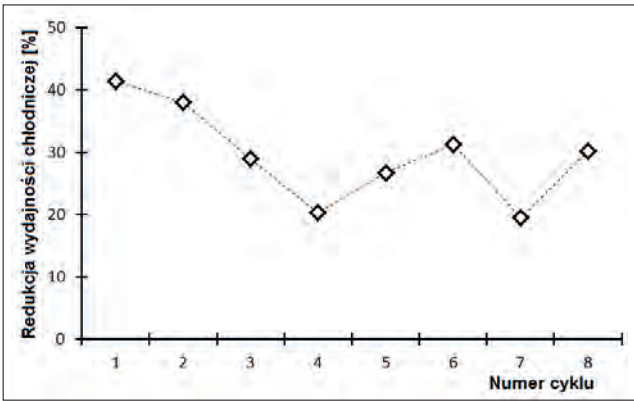
Fig. 9. By-pass factor before and after defrosting process for various operation cycles



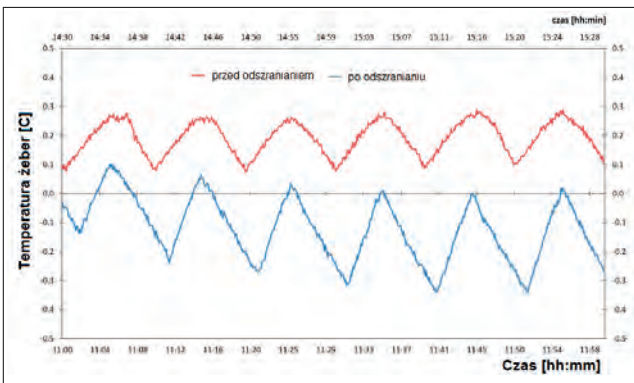
Rys. 10.

Zmiany wydajności chłodniczej badanej chłodnicy powietrza

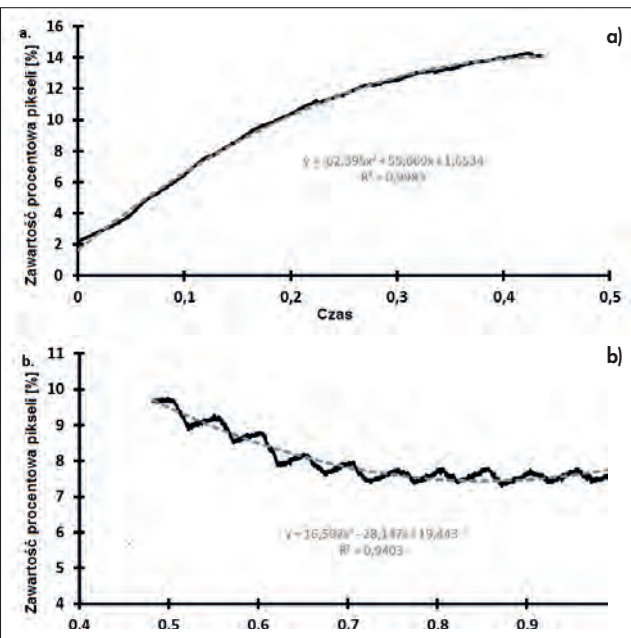
Fig. 10. Variation of refrigeration capacity of the tested air cooler



Rys. 11. Zmniejszenie wydajności chłodniczej badanego wymiennika w warunkach szronienia w kolejnych cyklach  
 Fig. 11. Reducing of refrigeration capacity of tested air cooler under frosting conditions in various operation cycles

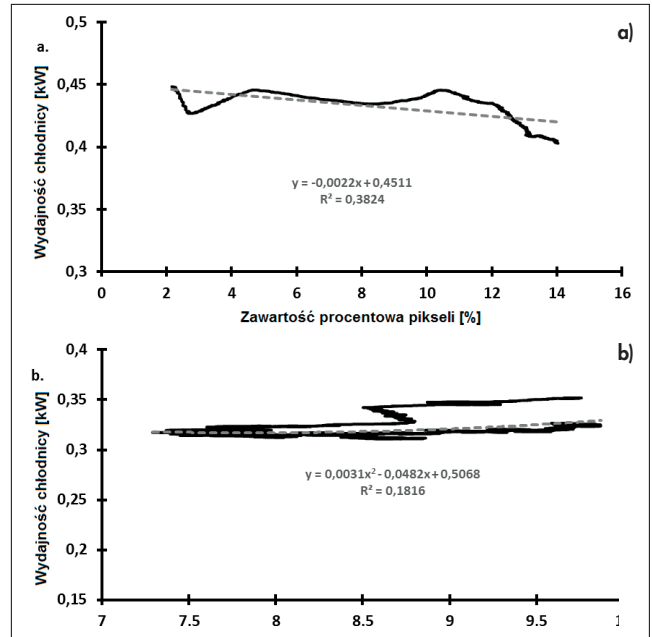


Rys. 12. Zmiany temperatury żeber podczas pomiarów  
 Fig. 12. Variations of fins temperatures during operation of air cooler



Rys. 13. Średnia zawartość pikseli reprezentujących szron na zdjęciach: a) przed punktem przegięcia; b) za punktem przegięcia  
 Fig. 13. Average number of pixels identifying frost in photographs: a) before inflection point; b) after inflection point.

(8 cykli) pokazano na rys. 11. Szronienie wywołało zmniejszenie wydajności badanej chłodnicy od 20 do 40% przez zwiększenie współczynnika obejścia o około 18 do 35% (rys. 9). Współczynnik



Rys. 14. Związek między zawartością pikseli reprezentujących szron, a wydajnością chłodniczą badanego wymiennika: a) przed punktem przegięcia; b) za punktem przegięcia  
 Fig. 14. Relationship between number of pixels identifying frost and refrigeration capacity of tested air cooler: a) before inflection point; b) after inflection point.

obejścia dla badanej chłodnicy powietrza okazał się bardzo wysoki, bowiem wynosił od 0,50 dla czystego wymiennika do 0,70 dla wymiennika oszronionego. Średni współczynnik obejścia to 0,68 i 0,55, odpowiednio przed i po odszranianiu. Dodatkowy opór termiczny, wprowadzony przez oszronienie i pogarszający warunki wymiany ciepła między powietrzem a glikolem, wywołał wzrost temperatury żeber, co pokazano na rys. 12. Uzyskane wartości współczynnika przenikania ciepła zestawiono w tabeli 1, uzyskano 11 – 21 W/(m<sup>2</sup>·K) dla powierzchni oszronionej i 15-31 W/(m<sup>2</sup>·K) dla powierzchni czystej (nieoszronionej). Maksymalny wzrost oporu cieplnego to 0,32 (m<sup>2</sup>·K)/W.

Na rys. 13 pokazano średni poziom oszronienia dla czterech analizowanych dni w funkcji czasu, odpowiednio przez (rys. 13a) i za (rys. 13b) punktem przegięcia. Punkt ten wyznacza maksymalną procentową zawartość pikseli na zdjęciu (rys. 6), która występowała w środku każdej serii. Przebieg szronienia się wymiennika był powtarzalny, więc krzywe szronienia jak na rys. 6 wyznaczone dla kolejnych serii pomiarowych miały podobny kształt. Równania aproksymacyjne dla obu krzywych z rys. 13 są następujące:

$$S_b = -62,395\tau^2 + 55,669\tau - 1,6534 \quad (7)$$

$$S_o = 16,502\tau^2 - 28,147\tau + 19,443 \quad (8)$$

Tabela 1. Parametry badanej chłodnicy podczas 8 cykli pracy  
 Table 1. Operation parameters of the tested air cooler during 8 selected operation cycles

przed odszranianiem (before defrosting)			po odszranianiu (after defrosting)			
Q <sub>c,fr</sub> [W]	k <sub>fr</sub> [W/(m <sup>2</sup> ·K)]	BF <sub>fr</sub>	Q <sub>c</sub> [W]	k [W/(m <sup>2</sup> ·K)]	BF	ΔR <sub>fr</sub> [m <sup>2</sup> K/W]
145,8	18	0,73	249,2	31	0,62	0,08
155,3	12	0,66	250,9	19	0,49	0,13
153,2	12	0,64	215,8	17	0,52	0,20
170,6	12	0,66	214,3	15	0,51	0,32
181,1	12	0,69	247,1	17	0,57	0,22
153,2	11	0,63	223,2	17	0,51	0,18
223,1	13	0,72	277,6	16	0,59	0,31
247,8	21	0,72	355,2	30	0,60	0,11

Równania (7) i (8) pozwalają przewidywać poziom oszronienia odpowiednio przed i za punktem przegięcia. We wzorach tych  $\tau$  jest bezwymiarowym czasem, gdzie 0 oznacza początek, a 1 koniec cyklu szronienia. Jeden cykl szronienia obejmuje czas między końcem jednego procesu odszraniania, a początkiem kolejnego. Zaproponowane równania mogą być zastosowane do dalszej optymalizacji pracy systemu odszraniania badanej chłodnicy powietrza. Podział krzywej szronienia na dwie części był konieczny ze względu na niską dokładność aproksymacji krzywej całego cyklu.

Związek między wydajnością chłodnicy z czterech serii pomiarowych a ilością szronu pokazano na rys. 14. Przybliżenie to jest mniej dokładne ze względu na wysokie wahania mocy wymiennika, wynoszące nawet 0,10 kW. Po początkowym spadku za punktem przegięcia (rys. 14b) moc chłodnicy lekko rośnie wraz ze wzrostem ilości szronu. Może to być wywołane zmianami w strukturze szronu prowadzącymi do zmniejszenia jego oporu termicznego lub osiągnięciem średnicy krytycznej przez warstwę.

## Podsumowanie

Na podstawie zaprezentowanych wyników można wyciągnąć następujące wnioski:

- Proponowana metoda analizy pozwala ocenić stopień oszronienia i jego wpływ na pracę chłodnicy powietrza na podstawie obserwacji wizualnej powierzchni wymiany ciepła podczas długoterminowej pracy wymiennika w komorze chłodniczej. Metoda ta pozwala na wyznaczenie korelacji opisujących stopień oszronienia w czasie pracy chłodnicy.
- Pokazano, że korelacja między stopniem oszronienia a mierzonymi wielkościami cieplno-przepływowymi jest wyraźnie widoczna, zwłaszcza w przypadku temperatur powietrza, glikolu oraz wydajności chłodniczej wymiennika. Konieczne jest określenie wszystkich wielkości, które są powiązane z procesem szronienia. Podstawowe wielkości, które również uwzględniono w analizie to temperatura żeber chłodnicy oraz przepływ

czynnika chłodzącego (glikolu).

- Zaprezentowane w artykule wyniki dotyczą jedynie chłodnicy badanej przez autorów. Opracowanie korelacji dla innych wymienników wymaga przeprowadzenia odrębnych pomiarów dla każdego wymiennika, na podstawie których można byłoby dokonać szerszych uogólnień.
- Zaproponowana metoda wymaga, aby obserwacje wizualne wymiennika zostały wykonane w tych samych warunkach, tj. przy tym samym oświetleniu i pozycji kamery. Pozwala to na ustalenie jednego zakresu odcieni szarości reprezentujących szron dla wszystkich analizowanych zdjęć. Innym zjawiskiem mogącym w nieznanym stopniu wpłynąć na wyniki pracy algorytmu zliczającego piksele są zmiany struktury powierzchni szronu na początku procesu odszraniania.

## Oznaczenia

BF	współczynnik obejścia
c	ciepło właściwe, J/(kg·K)
t	temperatura, °C
V	strumień objętości m <sup>3</sup> /s
$\rho$	gęstość, kg/m <sup>3</sup>
S	poziom oszronienia
$\tau$	bezwymiarowy czas

## Indeksy

c	parameter chłodnicy
fr	warunki szronienia
g	glikol
in	wlot chłodnicy
s	powierzchnia żeber
out	wylot chłodnicy
1	przed chłodnicą
2	za chłodnicą
a	przed punktem przegięcia
b	za punktem przegięcia

## LITERATURA

- [1] Hundy G.F. (2016) Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pumps, 5th edition, Butterworth-Heinemann, 2016.
- [2] Hayashi Y., Aoki A., Adachi S., Hori K. (1977) Study of frost properties correlating with frost formation types, Journal of Heat Transfer, 99, 239-245.
- [3] Sami S.M., Duong T. (1989) Mass and heat transfer during frost growth, ASHRAE Transactions, 95, 158-65.
- [4] Negrelli S., Hermes C.J.L. (2015) A semi-empirical correlation for the thermal conductivity of frost, International Journal of

Refrigeration, 58, 243-252.

- [5] Wang W., Guo Q.C., Lu W.P., Feng Y.C., Na W. (2012) A generalized simple model for predicting frost growth on cold flat plate, International Journal of Refrigeration, 35, 475-486.
- [6] Nascimento V.S. Jr., Loyola V.R., Hermes C.J.L. (2015) A study of frost build-up on parallel plate channels, Experimental Thermal and Fluid Science, 60, 328-336.
- [7] Tahavvor A.R., Yaghoubi M. (2011) Prediction of frost deposition on a horizontal circular cylinder under natural convection using artificial neural networks, International Journal of Refrigeration, 34, 560-566.
- [8] Getu H. M., Bansal P.K. (2011) New frost property correlations for a flat-finned-tube heat exchanger, International Journal of Thermal Sciences, 50, 544-577.
- [9] Amini M., Pishavar A.R., Yaghoubi M. (2014) Experimental study of frost formation on a fin-and-tube heat exchanger by natural convection, International Journal of Refrigeration, 46, 37-49.
- [10] Yan W., Li H., Wu Y., Lin J., Chang W. (2003) Performance of finned tube heat exchangers operating under frosting conditions, International Journal of Heat and Mass Transfer, 46, 871-877.
- [11] Padhmanabhan S.K., Fisher D.E., Cremaschi L., Moallem E. (2011) Modelling non-uniform frost growth on a fin-and-tube heat exchanger, International Journal of Refrigeration, 34, 2018-2030.
- [12] Lee S.H., Lee M., Yoon W.J., Kim Y. (2013) Frost growth characteristics of spirally-coiled circular fin-tube heat exchangers under frosting conditions, International Journal of Heat and Mass Transfer, 64, 1-9.
- [13] Wang F., Liang C., Yang M., Fan C., Zhang X. (2015) Effects of surface characteristic on frosting and defrosting behaviors of fin-tube heat exchangers, Applied Thermal Engineering, 75, 1126-1132.
- [14] Śmierciew K., Kołodziejczyk M., Gagan J., Butrymowicz D. (2018a) Numerical modeling of fin heat exchanger in application to cold storage, Heat Transfer Engineering, 30, issue 10, 874-884.
- [15] Śmierciew K., Kołodziejczyk M., Gagan J., Butrymowicz D. (2018b) Numerical simulations of fin and tube air cooler and heat and mass transfer in cold storage, Progress in Computational Fluid Dynamics, Vol. 18, No. 5, 325-332.
- [16] Śmierciew K., Butrymowicz D., Gagan J., Analiza pracy chłodnicy powietrza w warunkach szronienia, Instal, 2019, No. 6, str. 38-42.

## Podziękowania

Pracę zrealizowano przy wsparciu ze środków na badania w ramach pracy statutowej realizowanej w Instytucie Inżynierii Mechanicznej Politechniki Białostockiej.



Jeszcze można zamawiać prenumeratę miesięcznika Instal na 2020 rok.

Druk zamówienia na stronie [www.informacjainstal.com.pl](http://www.informacjainstal.com.pl)