

ASPEKT EKONOMICZNY ODZYSKU CIEPŁA W PRZEMYSŁOWEJ INSTALACJI CHŁODNICZEJ

Roman SZCZEPAŃSKI

Zenon BONCA

KATEDRA TECHNIKI CIEPLNEJ

Politechnika Gdańska

Do szczegółowej analizy celowości odzysku ciepła w urządzeniach chłodniczych wybrano urządzenia za-instalowane w Zakładzie Mięsnym „SKIBA” w Chojnicach, w którym powierzchnia technologiczna sięga 6 tys. m². Zakłady te posiadają numer eksportowy i tym samym zostały wpisane na listę krajowych zakładów uprawnionych do produkcji i eksportu na rynki państw członkowskich Unii Europejskiej. Znaczną część produkowanych wyrobów sprzedają one poprzez własną sieć sprzedaży obejmującą swym zasięgiem Polskę Północno-Zachodnią. Średnia skala produkcji zakładu sięga do 70-ciu ton dziennie. Oferta handlowa obejmuje zarówno wyroby luksusowe typu szynki, kiełbasy surowo dojrzewające, a także produkty tradycyjne, takie jak kiełbasy, rolady mięsne, wędliny podrobowe, pasztety oraz mięsa surowe (mięso wieprzowe, wołowe i drób).

1. CHARAKTERYSTYKA TECHNICZNA INSTALACJI CHŁODNICZEJ

W Zakładach Mięsnych „SKIBA” urządzenia chłodnicze pracują w oparciu o czynnik chłodniczy **R 22** (stara instalacja) oraz **R 404A** (nowa instalacja). Instalacja chłodnicza pracuje całkowicie automatycznie.

1.1 Instalacja chłodnicza na czynnik R 22

Instalacja chłodnicza pracująca na czynniku R 22 składa się z pięciu jednostopniowych obiegów o następujących temperaturach parowania i przeznaczeniu:

- obieg $t_0 = -30^\circ\text{C}$ dla pomieszczeń Mroźni (zamrażalni) z temperaturą w komorze $t = -24^\circ\text{C}$,
- obieg $t_0 = -10^\circ\text{C}$ dla pomieszczeń wychładzalni i chłodni z temperaturą w komorach $t = 0/+4^\circ\text{C}$,
- obieg $t_0 = -5^\circ\text{C}$ dla komór wędzenia i dojrzewania,
- obieg $t_0 = 0^\circ\text{C}$ dla pomieszczeń produkcyjnych z temperaturą w komorach $t = +8/+14^\circ\text{C}$,
- obieg $t_0 = +5^\circ\text{C}$ dla central klimatyzacyjnych. Jest to podbieg włączony do obiegu $t_0 = 0^\circ\text{C}$.

Wydatność chłodnicza zespołów sprężarkowych w poszczególnych obiegach wynosi:

- obieg $t_0 = -30^\circ\text{C}$, $\dot{Q}_0 \approx 38 \text{ kW}$ przy $t_k = +40^\circ\text{C}$,

- obieg $t_0 = -10^\circ\text{C}$, $\dot{Q}_0 \approx 421 \text{ kW}$ przy $t_k = +40^\circ\text{C}$,
- obieg $t_0 = -5^\circ\text{C}$, $\dot{Q}_0 \approx 144 \text{ kW}$ przy $t_k = +40^\circ\text{C}$,
- obieg $t_0 = 0^\circ\text{C}$, $\dot{Q}_0 \approx 238 \text{ kW}$ przy $t_k = +40^\circ\text{C}$,

Ogółem jest to **841 kW**. Pobór mocy elektrycznej przez instalacje chłodnicze kształtuje się na poziomie ok. **300 kW**.

1.2 Instalacja chłodnicza na czynnik R 404A

Instalacja chłodnicza pracująca na czynniku R 404A składa się z trzech jednostopniowych obiegów o następujących temperaturach parowania i przeznaczeniu:

- obieg $t_0 = -22^\circ\text{C}$ dla zamrażania i komór intensywnego schładzania wyrobów,
- obieg $t_0 = -10^\circ\text{C}$ dla chłodzenia pomieszczeń o temperaturach od -4°C do $+6^\circ\text{C}$,
- obieg $t_0 = 0^\circ\text{C}$ dla chłodzenia pomieszczeń produkcyjnych o temperaturze $+10^\circ\text{C}$ do $+12^\circ\text{C}$ oraz do centrali klimatyzacyjnej.

Każdy z tych obiegów został wyposażony w zespoły sprężarkowe firmy Cool, których wydajność chłodnicza wynosi:

- obieg $t_0 = -22^\circ\text{C}$, $\dot{Q}_0 \approx 104,5 \text{ kW}$ przy $t_k = +40^\circ\text{C}$. Układ wyposażony w dwie półhermetyczne sprężarki typu D8 DH500X o wydajności $2 \cdot 52,25 \text{ kW}$ z dwustopniową regulacją wydajności (100% i 50%). Pobór mocy elektrycznej zespołu sprężarek wynosi $N_e = 50,9 \text{ kW}$;
- obieg $t_0 = -10^\circ\text{C}$, $\dot{Q}_0 \approx 303 \text{ kW}$ przy $t_k = +40^\circ\text{C}$. Układ wyposażony w trzy półhermetyczne sprężarki typu D8 DJ600X o wydajności $3 \cdot 101 \text{ kW}$ z trzystopniową regulacją wydajności (100%, 75% i 50%). Pobór mocy elektrycznej zespołu sprężarek wynosi $N_e = 119,4 \text{ kW}$;
- obieg $t_0 = 0^\circ\text{C}$, $\dot{Q}_0 \approx 317,4 \text{ kW}$ przy $t_k = +40^\circ\text{C}$. Układ wyposażono w trzy półhermetyczne sprężarki typu D6 DJ400X o wydajności $3 \cdot 105,8 \text{ kW}$ z trzystopniową regulacją wydajności (100%, 66% i 33%). Pobór mocy elektrycznej zespołu sprężarek wynosi $N_e = 101,1 \text{ kW}$.

Ogółem jest to ok. **725 kW**.

Zespoły sprężarkowe tych obiegów wyposażone są w odlejacze, zbiorniki oleju i instalację powrotu oleju do sprężarki, automatykę zabezpieczającą i ruchową oraz niezbędną armaturę. Skraplanie czynnika chłodniczego odbywa się

w skraplaczach chłodzonych powietrzem, usytuowanych na podeście nad maszynownią chłodniczą. Praca wentylatorów skraplacza jest automatyczna. Zbiorniki ciekłego czynnika umieszczone są w maszynowni chłodniczej. Komory o temperaturze -15°C do $+6^{\circ}\text{C}$ chłodzone są podsufitowymi chłodnicami powietrza również produkcji firmy Cool z odtajaniem elektrycznym przy pomocy grzałek zabudowanych w parownikach i tacach chłodnic powietrza, a w zamrażalni dodatkowo podgrzewane są obudowy wentylatorów i rury spustowe skroplin z odtajania.

Komory produkcyjne o temperaturach $+10^{\circ}\text{C}$ do $+12^{\circ}\text{C}$ chłodzone są przy pomocy podsufitowych chłodnic powietrza tego samego producenta. W kilku komorach powietrze rozprawdane jest za pośrednictwem kanałów tekstylnych. Świeże powietrze dostarczane do pomieszczeń produkcyjnych ochładzane jest w centrali klimatyzacyjnej. Zasilanie chłodnic powietrza czynnikiem odbywa się przez modułacyjne zawory rozprężne typu AKV produkcji firmy Danfoss.

W obiekcie, który wybrano do analizy techniczno – ekonomicznej celowości odzysku ciepła przegrzania i ciepła skraplania, zainstalowanych jest łącznie siedem obiegów chłodniczych. Cztery z nich pracują na czynniku R 22, są to obiegi o temperaturach parowania $t_0 = -30^{\circ}\text{C}$, -10°C , -5°C i 0°C , pozostałe trzy obiegi pracują na czynniku R 404A; są to obiegi o temperaturach parowania czynnika $t_0 = -22^{\circ}\text{C}$, -10°C i 0°C . Łączna wydajność chłodnicza tych obiegów, to ok. **1460 kW** przy temperaturze skraplania $t_k = +40^{\circ}\text{C}$. Pobór mocy zainstalowanych sprężarek sięga ok. **567 kW**.

Urządzenia chłodnicze zainstalowane w analizowanym obiekcie można zaliczyć do dużych instalacji chłodniczych. Szacunkowa ilość ciepła wydzielanego z instalacji chłodniczej, to ok. **2 000 kW**. Jak widać jest to ilość znaczna, którą można w pewnym stopniu zagospodarować na określone cele grzewcze.

2. OCENA WIELKOŚCI CIEPŁA PRZEGRZANIA GORĄCYCH PAR I CIEPŁA SKRAPLANIA DLA ZMIENNYCH OBCIĄŻEŃ CIEPLNYCH W OBIEK- CIE

2.1 Ocena wielkości ciepła skraplania i ciepła przegrzania dla parametrów nominalnych

Do wyznaczenia ciepła skraplania i ciepła przegrzania dla nominalnych parametrów pracy urządzeń chłodniczych przyjęto wydajność chłodniczą wyznaczoną z założeń projektowych poszczególnych obiegów. Obiegi chłodnicze pracujące na czynniku R 22 zapewniają dochłodzenie ciekłego czynnika na poziomie 10 K (rys. 1). Natomiast w obiegach pracujących na czynniku R 404A takie dochłodzenie nie występuje. Wszystkie obiegi pracują na tej samej temperaturze skraplania, która wynosi $t_k = +40^{\circ}\text{C}$.

Z oceny wielkości ciepła skraplania dla warunków nominalnych wg założeń projektowych wynika, iż jednostkowe ciepło skraplania i jednostkowe ciepło przegrzania są

najwyższe dla obiegów pracujących na najniższych temperaturach parowania dla czynnika R 22 (rys. 2). Procentowy udział jednostkowego ciepła przegrzania do jednostkowego ciepła skraplania, to ok. 15% dla obiegów pracujących na tym czynniku, a dla czynnika R 404A jest to ok. 6%. Natomiast ilość ciepła skraplania i ciepła przegrzania, którą można wykorzystać do celów grzewczych, uzależniona jest od strumienia masy czynnika chłodniczego przetłaczanego przez określony zespół sprężarek.

Z obliczeń wielkości charakterystycznych dla obiegów chłodniczych istniejących w wybranym do analizy obiekcie, dla nominalnych parametrów pracy tych urządzeń wynika, iż dla łącznej wydajności chłodniczej $\dot{Q}_0 = 1566 \text{ kW}$ otrzymujemy:

- zapotrzebowanie mocy napędowej o łącznej wartości $N_e = 392 \text{ kW}$,
- łączną wartość ciepła skraplania $\dot{Q}_k = 1958 \text{ kW}$,
- ilość ciepła przegrzania $\dot{Q}_p = 182 \text{ kW}$.

Tak więc są to maksymalne wartości, które można uzyskać podczas pracy urządzeń chłodniczych. W rzeczywistości ilość ciepła skraplania, które można zagospodarować do celów grzewczych będzie mniejsza w zależności od aktualnej wydajności chłodniczej w określonym czasie. Zmiana wydajności chłodniczej realizowana jest dzięki zmianie wydajności objętościowej agregatu sprężarkowego.

2.2 Ocena wielkości ciepła skraplania i ciepła przegrzania dla parametrów rzeczywistych

W celu wyznaczenia rzeczywistej wielkości ciepła skraplania i ciepła przegrzania należy sprawdzić z jaką wydajnością pracują sprężarki poszczególnych obiegów chłodniczych. Dzięki zainstalowaniu w wytypowanym do analizy zakładzie systemu monitoringu ADAP-KOOL[®], możliwe jest odczytanie i przeanalizowanie historii pracy agregatów chłodniczych oraz innych wielkości charakterystycznych obiegu. Dane potrzebne do wyznaczenia wielkości ciepła, jakie można odzyskać z wszystkich obiegów pochodzą z jednego tygodnia (od 1 do 7 maja 2006 r.). Na rysunku 3 pokazano przykładowy dobowy wykres zmian wydajności agregatu sprężarkowego dla obiegu -10°C dla czynnika R 22 uzyskany z zapisu w systemie ADAP-KOOL[®], a dotyczy on dnia 4 maja 2006 roku.

Powyższe dane umożliwiają wyznaczenie przybliżonej średniej wartości wydajności objętościowej sprężarek, która odzwierciedla rzeczywiste parametry pracy urządzeń chłodniczych. Jak wynika z zapisu, każdy obieg chłodniczy zainstalowany w zakładzie pracuje z różną wydajnością objętościową sprężarek w ciągu dnia. Niektóre z obiegów pracują na wyższej wydajności podczas godzin nocnych, a niektóre podczas godzin dziennych. Dzięki systemowi ADAP-KOOL[®] możliwe jest wyznaczenie rzeczywistej ilości ciepła skraplania i ciepła przegrzania w ciągu roku, dnia a nawet godziny. W tabeli 2 przedstawiono średnie wartości wydajności objętościowej agregatów sprężarkowych, które pozwalają wyznaczyć rzeczywistą ilość ciepła skraplania i ciepła przegrzania.

Tab. 1. Zestawienie wyników obliczeń wielkości charakterystycznych obiegów chłodniczych w wybranym do analizy obiekcie wg parametrów nominalnych

L.p.	Czynnik chłodniczy	t_0 [°C]	q_k [kJ/kg]	q_p [kJ/kg]	\dot{Q}_0 [kW]	ϵ [-]	\dot{m}_{rz} [kg/s]	N_e [kW]	\dot{Q}_k [kW]	\dot{Q}_p [kW]
1	R 22	-30	210	38,3	38	2,549	0,251	14,9	52,9	9,6
2		-10	200	27,9	421	4,059	2,624	103,7	524,7	73,2
3		-5	194	22,0	144	4,964	0,891	29,0	173,0	19,7
4		0	191	19,7	238	5,875	1,452	40,5	278,5	28,7
5	R 404A	-22	135	9	104,5	2,462	1,089	42,4	146,9	9,7
6		-10	134	8	303	3,323	2,942	91,1	394,2	23,5
7		0	132	6	317,4	4,500	2,939	70,5	387,9	17,6
RAZEM					1565,9			392,3	1958,2	182,2

Tab. 2. Zestawienie średniej wydajności objętościowej agregatów sprężarkowych poszczególnych obiegów chłodniczych występującej w wybranym do analizy obiekcie wg systemu ADAP-KOOL®

L.p.	Czynnik chłodniczy	t_0 [°C]	t_k [°C]	\dot{V}_d [%]
1	R 22	-30	+40	48,3
2		-10		40,5
3		-5		38,1
4		0		48,7
5	R 404A	-22	+40	45
6		-10		40
7		0		24,6

Tab. 3. Zestawienie wyników obliczeń wielkości charakteryzujących pracę poszczególnych obiegów chłodniczych w wybranym do analizy obiekcie wg parametrów z systemu monitoringu ADAP-KOOL®

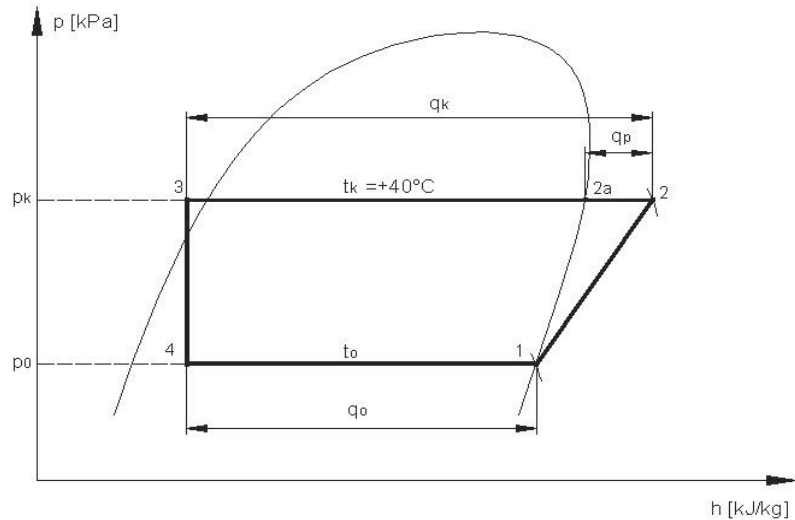
L.p.	Czynnik chłodniczy	t_0 [°C]	q_k [kJ/kg]	q_p [kJ/kg]	\dot{Q}_0 [kW]	ϵ [-]	\dot{m}_{rz} [kg/s]	N_e [kW]	\dot{Q}_k [kW]	\dot{Q}_p [kW]
1	R 22	-30	210	38,3	18,3	2,549	0,12	7,2	25,5	4,7
2		-10	200	27,9	170,5	4,059	1,06	42	212,5	29,6
3		-5	194	22,0	54,8	4,964	0,34	11	65,9	7,5
4		0	191	19,7	115,9	5,875	0,71	19,7	135,6	13,9
5	R 404A	-22	135	9	47	2,462	0,49	19,1	66,1	4,4
6		-10	134	8	121,2	3,323	1,17	36,5	157,7	9,4
7		0	132	6	78,1	4,500	0,72	17,3	95,4	4,3
RAZEM					605,9			152,9	758,8	73,9

Dla tak określonej wydajności objętościowej sprężarek obliczono wielkości charakteryzujące pracę poszczególnych obiegów. Wyniki tych obliczeń zestawiono w tabeli 3.

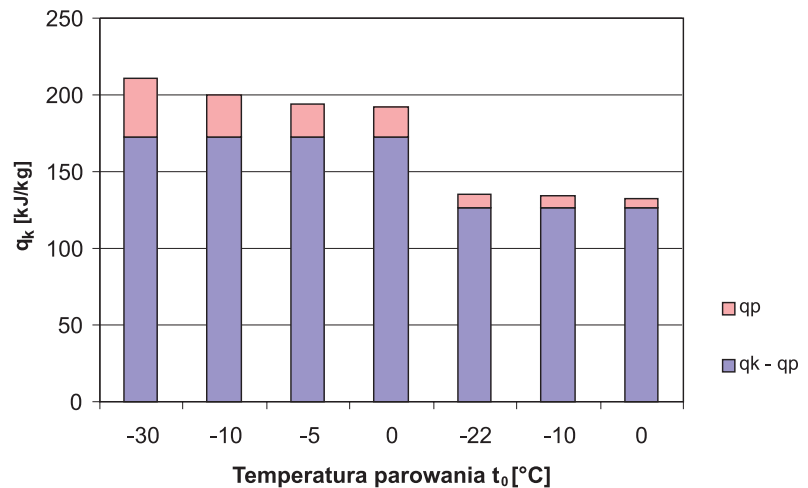
Podsumowując powyższą ocenę wielkości ciepła odpadowego można stwierdzić, iż rzeczywista wielkość wydajności chłodniczej w analizowanych okresie eksploatacji zakładu jest znacznie niższa niż założenia projektowe, bowiem kształtuje się ona na poziomie ~ 40% wartości maksymalnej, jaką można uzyskać z zainstalowanych agregatów sprężarkowych. Wraz ze spadkiem wydajności chłodniczej następuje spadek ciepła skraplania i ciepła przegrzania o podobną wartość, jak wydajność chłodnicza. Zatem, jeżeli założymy, że sprężarki będą pracowały na pełnej wydajności i dla takich danych określimy ilość ciepła, jakie można odzyskać z urządzeń chłodniczych, to obliczony zwrot kosztów inwestycyjnych dla węzła odzysku ciepła okaże się nierealny, ponieważ w rzeczywistości koszty te zwrócą po znacznie dłuższym okresie niż zakładany. Nie można jednak stwierdzić, że inwestycja w odzysk ciepła skraplania nie przyniesie w ostateczności zysku, ponieważ generalnie otrzymujemy energię ciepłą „za darmo”.

3. OCENA WIELKOŚCI CIEPŁA PRZEGRZANIA GORĄCYCH PAR I CIEPŁA SKRAPLANIA PRZY RÓŻNYCH JEGO PARAMETRACH

W celu dokonania oceny wpływu zmiany temperatury skraplania przeprowadzono obliczenia dla siedmiu analizowanych obiegów dla wyższej jej wartości, równej +50°C. Wynika z nich, że podwyższenie tej temperatury o 10 K powoduje znaczne zwiększenie zapotrzebowania mocy napędowej sprężarek N_e , szczególnie jest to widoczne dla obiegów o dużej wydajności chłodniczej. Wartość ta zwiększa się dla czynnika R 22 w zakresie od 15% do 22%, a dla czynnika R 404A zapotrzebowanie mocy zwiększy się o ok. 30%. Łączne zapotrzebowanie mocy po podwyższeniu temperatury skraplania, to ok. **533 kW**. Czyli różnica między zapotrzebowaniem mocy napędowej N_e dla parametrów nominalnych ($t_k = +40^\circ\text{C}$) i dla podwyższonej temperatury skraplania do wartości $t_k = +50^\circ\text{C}$ wyniesie:

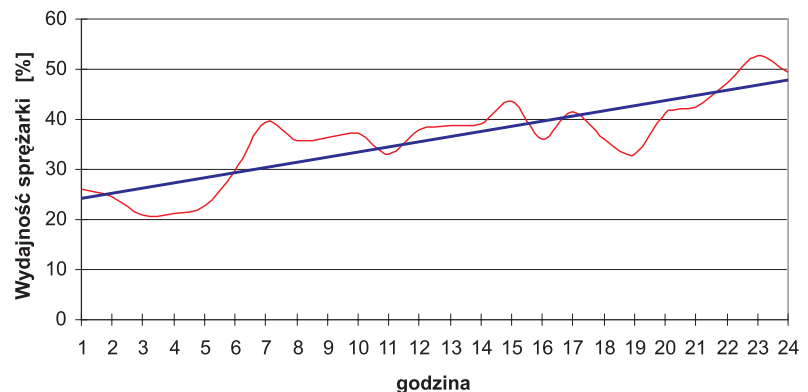


Rys. 1 Przemiany termodynamiczne w analizowanych obiegach chłodniczych



Rys. 2. Porównanie jednostkowego ciepła przegrzania q_p do ciepła skraplania q_k w poszczególnych obiegach chłodniczych występujących w wybranym do analizy obiekcie dla parametrów nominalnych

Czwartek 04.05.06r.



Rys. 3. Dobowy wykres rzeczywistej wydajności agregatu sprężarkowego dla obiegu $t_o = -10^\circ\text{C}$ dla czynnika R 22 wg systemu ADAP-KOOL®

$$N_e' - N_e = 533 \text{ kW} - 392 \text{ kW} = 141 \text{ kW}$$

Tak więc zapotrzebowanie mocy do napędu sprężarek w omawianym przypadku wzrasta o ok. 36%, przy podwyższeniu temperatury skrapla-

Tabela 4 Temperatuty tłoczenia w poszczególnych obiegach chłodniczych występujących w Z.M. "SKIBA" dla różnych temperatur skraplania

L.p.	Czynnik chłodniczy	t_b [°C]	t_u [°C]	
			dla $t_k = +40^\circ\text{C}$ [°C]	dla $t_k = +30^\circ\text{C}$ [°C]
1	R 22	-30	80	66
2		-10	69	54
3		-5	61	47
4		0	59	45
5	R 404A	-22	48	38
6		-10	47	36
7		0	46	34

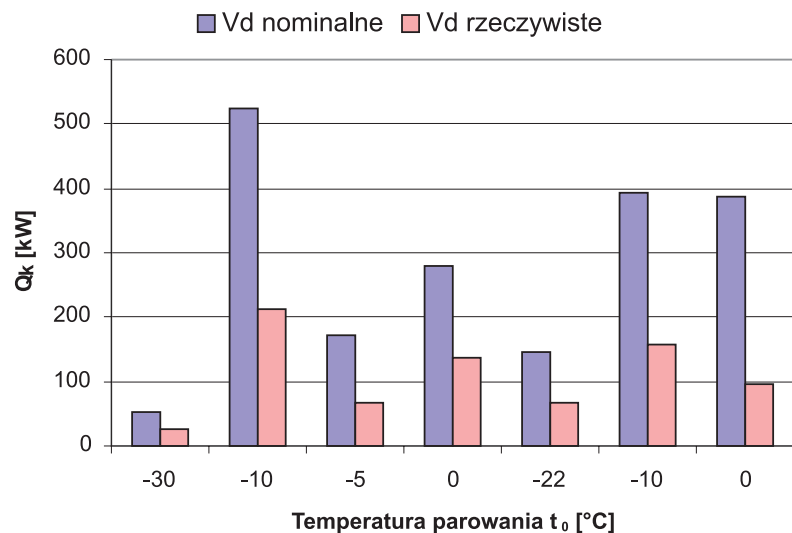
nia o 10 K.

Rysunek 6 ilustruje różnicę między ciepłem skraplania dla temperatury skraplania +40°C i +50°C. Analiza porównawcza wykazuje, że wzrost temperatury skraplania powoduje wzrost ciepła skraplania. Dla obiegów pracujących na czynniku R 22 podwyższenie temperatury skraplania spowodowało wzrost ciepła skraplania o ok. 4,5%, natomiast dla obiegów pracujących z czynnikiem R 404A wzrost ten jest większy i wynosi ok. 10%. Łączna wartość ciepła skraplania wzrosła w porównaniu do wartości początkowej o 7%. Różnica ta wynosi:

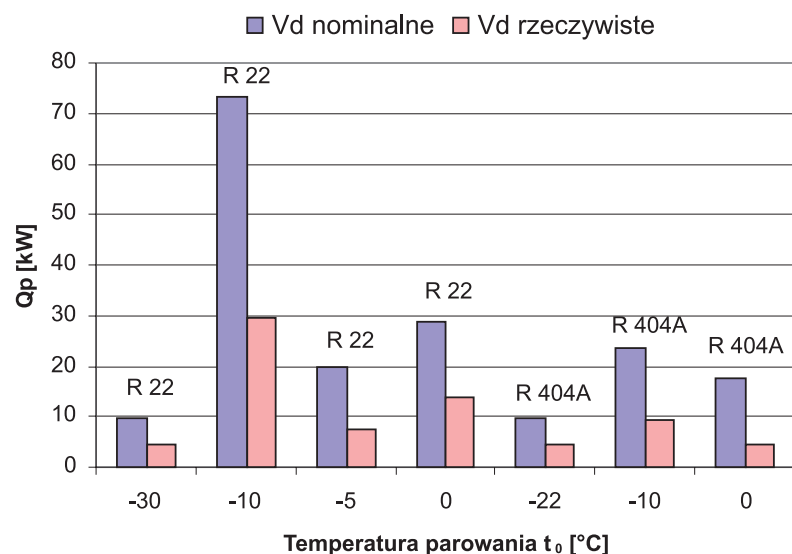
$$\dot{Q}_k' - \dot{Q}_k = 2099 \text{ kW} - 1958 \text{ kW} = 141 \text{ kW}$$

Widać, że ilość ciepła skraplania wzrosła o wartość energii, którą dodatkowo dostarczyliśmy do napędu agregatów sprężarkowych. Wzrost ciepła skraplania spowodowany jest głównie wzrostem ciepła przegrzania \dot{Q}_p , które wzrosło od 16% do 52% w zależności od rodzaju czynnika chłodniczego, z którym pracuje dany obieg chłodniczy. Porównanie ciepła przegrzania dla temperatury nominalnej i podwyższonej o 10 K przedstawiono na rysunku 7. Różnica między ciepłem skraplania a ciepłem przegrzania po zmianie parametrów pracy skraplacza nie wykazuje większych zmian wartości nominalnej, ponieważ zmiany te kształtują się na poziomie od 1% do 6%.

Podwyższenie temperatury skraplania wpływa niekorzystnie na większość parametrów związanych z pracą agregatów sprężarkowych. Celem podwyższenia tej temperatury może być osiągnięcie wyższej temperatury oraz większej ilości medium



Rys. 4. Porównanie ciepła skraplania dla nominalnej i rzeczywistej wydajności objętościowej agregatów sprężarkowych



Rys. 5. Porównanie ciepła przegrzania dla nominalnej i rzeczywistej wydajności objętościowej agregatów sprężarkowych

odbierającego ciepło na cele grzewcze.

4. PRÓBA UZASADNIENIA RACJI EKONOMICZNEJ ODZYSKU CIEPŁA DLA RÓŻNYCH WARUNKÓW

4.1 Czy opłaca się zmniejszyć zużycie energii przez obniżenie ciśnienia skraplania i odzysk tylko ciepła przegrzania ?

Aby odpowiedzieć na to pytanie, poniżej przedstawiona zostanie krótka analiza porównawcza obrazująca zmiany ilości ciepła skraplania i ciepła przegrzania oraz zmiany zapotrzebowania na energię elektryczną dla nominalnej temperatury skraplania $t_k = +40^\circ\text{C}$ i po jej obniżeniu do wartości $t_k = +30^\circ\text{C}$. Celem, na który zostanie przeznaczone odzyskane ciepło od urządzeń chłodniczych jest podgrzewanie ciepłej wody użytkowej, ponieważ w Zakładach Mięśnych „SKIBA” istnieje duże zapotrzebowanie na c.w.u. o temperaturze 55°C .

Do obliczeń przyjęto rzeczywiste wydajności agregatów sprężarkowych. Z tabeli 4 widać, że w niektórych obiegach chłodniczych nie można uzyskać zakładanej końcowej temperatury c.w.u., która ma wynosić $+55^\circ\text{C}$. Dlatego założono, że proces podgrzewania wody będzie przebiegał w następujących etapach:

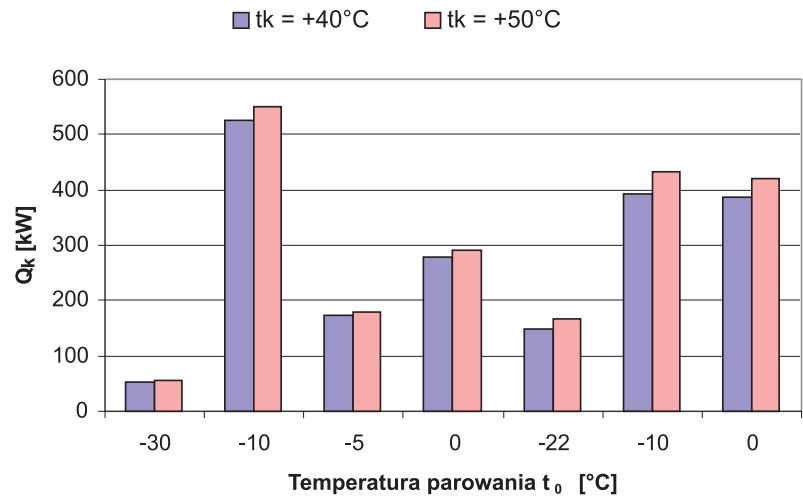
a) dla $t_k = +40^\circ\text{C}$:

- dla obiegów z czynnikiem R 22 c.w.u. będzie podgrzewana od $+10^\circ\text{C}$ do $+55^\circ\text{C}$ z ciepła przegrzania,
- dla obiegów z czynnikiem R 404A c.w.u. będzie podgrzewana od $+10^\circ\text{C}$ do $+40^\circ\text{C}$ z ciepła przegrzania, a od $+40^\circ\text{C}$ do $+55^\circ\text{C}$ poprzez grzałki elektryczne;

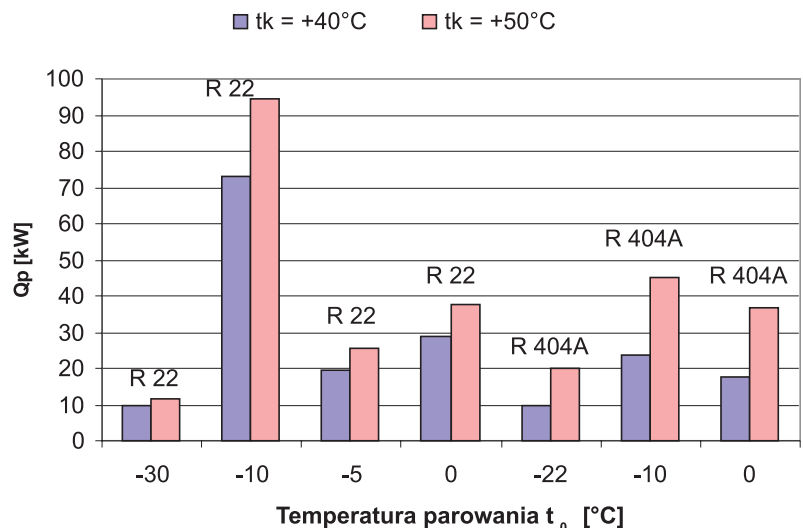
b) dla $t_k = +30^\circ\text{C}$:

- dla obiegów z czynnikiem R 22 c.w.u. będzie podgrzewana od $+10^\circ\text{C}$ do $+40^\circ\text{C}$ z ciepła przegrzania, a od $+40^\circ\text{C}$ do $+55^\circ\text{C}$ poprzez grzałki elektryczne,
- dla obiegów z czynnikiem R 404A c.w.u. będzie podgrzewana od $+10^\circ\text{C}$ do $+30^\circ\text{C}$ z ciepła przegrzania, a od $+30^\circ\text{C}$ do $+55^\circ\text{C}$ poprzez grzałki elektryczne,

Na rysunku 8 przedstawiono ilość c.w.u. możliwą do uzyskania z ciepła przegrzania z istniejących obiegów w Zakładach Mięśnych „SKIBA” dla różnych parametrów procesu skraplania. Obniżenie temperatury skraplania o 10 K spowoduje obniżenie ilości uzyskiwanej c.w.u. o **4090 litrów** w ciągu jednej doby. Warto zauważyć, że wraz ze spadkiem temperatury skraplania nastąpi



Rys. 6. Porównanie wyników obliczeń wydajności cieplnej skraplacza dla poszczególnych obiegów chłodniczych dla parametrów nominalnych wg założeń projektowych dla $t_k = +40^\circ\text{C}$ oraz $+50^\circ\text{C}$



Rys.7. Porównanie wyników obliczeń ciepła przegrzania dla poszczególnych obiegów chłodniczych dla parametrów nominalnych wg założeń projektowych dla $t_k = +40^\circ\text{C}$ oraz $+50^\circ\text{C}$

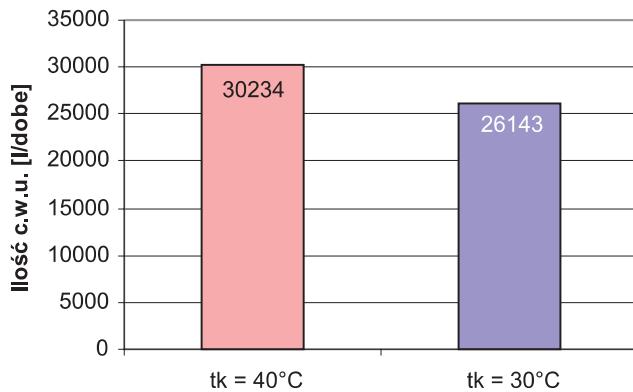
spadek zapotrzebowania mocy napędowej sprężarek o ok. **787 kW** na dobę (rys. 9).

Po przeliczeniu uzyskanej ilości c.w.u. na energię elektryczną, którą należałoby dostarczyć do ogrzania takiej jej ilości od temperatury $+10^\circ\text{C}$ do $+55^\circ\text{C}$ otrzymujemy:

- do podgrzania **30234 l** wody potrzebne jest **1370 kW** energii elektrycznej w ciągu doby,
- do podgrzania **26143 l** wody potrzebne jest **1184 kW** energii elektrycznej w ciągu doby.

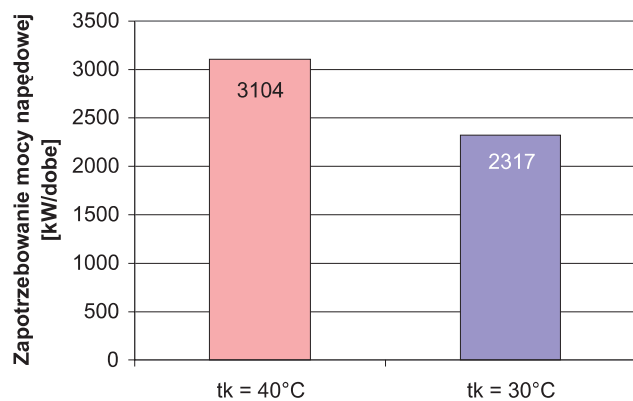
Tak więc chcąc uzyskać taką samą ilość ciepłej wody użytkowej po obniżeniu temperatury skraplania o 10 K należałoby pozostałe **4090 litrów** podgrzać elektrycznie, co wymagałoby doprowadzenia **185 kW** energii elektrycznej w ciągu doby.

Łącznie, aby podgrzać **30234 litry** wody od temperatury $+10^\circ\text{C}$ do $+55^\circ\text{C}$ należy dostarczyć energię elektryczną do napędu sprężarek chłodniczych oraz do elektrycznych podgrzewaczy wody, które miałyby za zadanie dogrzewanie wody do temperatury $+55^\circ\text{C}$.



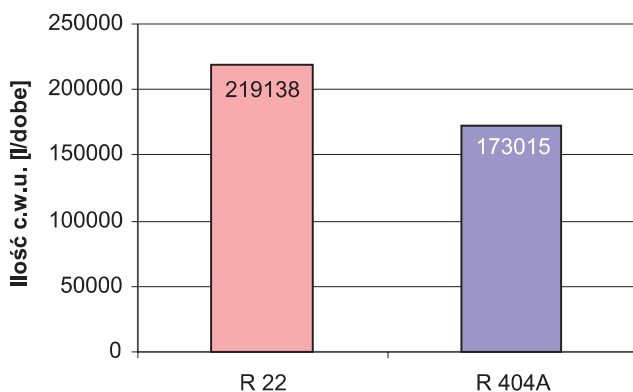
Temperatura skraplania

Rys. 8. Porównanie obliczeń ilości c.w.u. o temperaturze 55°C, jaką można uzyskać z 7 obiegów chłodniczych istniejących w Z.M. „SKIBA” w ciągu doby



Temperatura skraplania

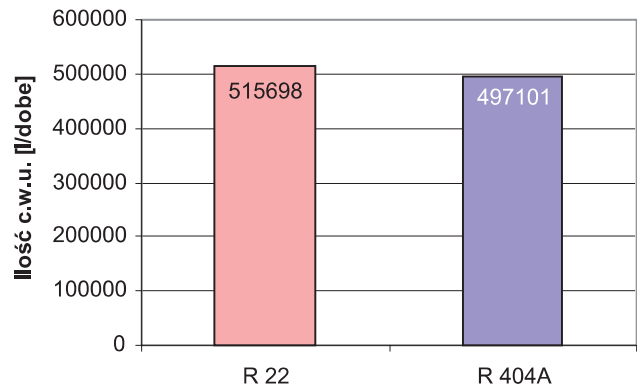
Rys. 9. Porównanie obliczeń zapotrzebowania mocy napędowej sprężarek N_e w ciągu doby zsumowane z 7 obiegów chłodniczych istniejących w Z.M. „SKIBA”



Dla obiegów chłodniczych z czynnikiem

Rys. 10. Ilość wody podgrzanej z 80% ciepła skraplania w ciągu doby dla rzeczywistej wydajności chłodniczej:
 - od 10 do 30°C z obiegów pracujących z czynnikiem R 404A,
 - od 30 do 55°C z obiegów pracujących z czynnikiem R 22.

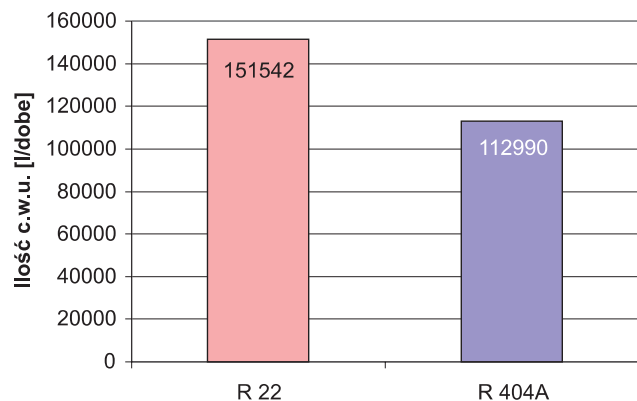
Podsumowując zagadnienie opłacalności obniżenia zużycia energii elektrycznej poprzez obniżenie temperatury skraplania, można stwierdzić, że obniżenie tego parametru o 10 K nie spowoduje zbyt dużej oszczędności energii elektrycznej. W analizowanym przypadku spadek zużycia



Dla obiegów chłodniczych z czynnikiem

Rys. 11. Ilość wody podgrzanej z 80% ciepła skraplania w ciągu doby dla maksymalnej wydajności chłodniczej:

- od 10 do 30°C z obiegów pracujących z czynnikiem R 404A,
- od 30 do 55°C z obiegów pracujących z czynnikiem R 22.



Dla obiegów chłodniczych z czynnikiem

Rys. 12. Ilość wody podgrzanej z 50% ciepła skraplania w ciągu doby dla rzeczywistej wydajności chłodniczej:

- od 10 do 30°C z obiegów pracujących z czynnikiem R 404A,
- od 30 do 55°C z obiegów pracujących z czynnikiem R 22.

energii, to **276 kW** dziennie, a rocznie **100740 kW**. Wartość ta może ulec zmianie w zależności od zastosowanej metody i urządzenia dogrzewającego c.w.u. do temperatury +55°C. Przeliczając tą wartość energii elektrycznej na złotówki, roczne oszczędności wyniosą $100740 \times 0,2 \text{ PLN} \approx$ **20 000 PLN**.

4.2 Czy zasadne jest odzyskiwanie całego lub części ciepła skraplania, aby utrzymać zakładane parametry nośnika ciepła w źródle górnym ?

Aby odpowiedzieć sobie na to pytanie, należy przeprowadzić kolejną analizę obliczeniową, w której zawarte będą możliwe do osiągnięcia ilości c.w.u. oraz parametry temperaturowe tej wody. Podczas odzysku całego lub części ciepła skraplania, należy zapewnić możliwie stałą temperaturę wody doprowadzanej do wymiennika ciepła. Celem tego jest utrzymanie temperatury skraplania (ciśnienia skraplania) na stałym poziomie. Do przeprowadzenia analizy założono nominalną wartość temperatury skraplania, która wynosi $t_k = +40^\circ\text{C}$. Temperatura ciepłej wody użytkowej po podgrzaniu powinna wynosić +55°C. Jednak dla obie-

gów chłodniczych pracujących z czynnikiem R 404A nie jest możliwe osiągnięcie tak wysokiej temperatury c.w.u., ponieważ temperatura końca sprężania jest zbyt niska (tab. 4). Dlatego też do wyznaczenia ilości c.w.u. jaką można z tych siedmiu obiegów uzyskać, przyjęto następujący proces podgrzewania wody:

- podgrzewanie wody od temperatury +10°C do 30°C ciepłem skraplania z trzech obiegów pracujących z czynnikiem R 404A,
- podgrzewanie wody od temperatury +30°C do +55°C ciepłem skraplania z czterech obiegów pracujących z czynnikiem R 22.

Tak więc wymienniki do odzysku ciepła dla czynników R 404A i R 22 będą wzajemnie się uzupełniały. Do analizy założono możliwie maksymalny odzysk ciepła skraplania na poziomie 80%. Pozostała część tego ciepła będzie oddawana w skraplaczach chłodzonych powietrzem.

Przyjęte założenia pozwalają wyznaczyć ilość możliwej do uzyskania c.w.u. (rys. 10–12).

Zapotrzebowanie na ciepłą wodę użytkową o temperaturze 55°C w Zakładach Mięśnych „SKIBA” kształtuje się na poziomie ok. **100 m³** (100 000 litrów) na dobę. Jak wynika z rysunku 10 dla rzeczywistej wydajności chłodniczej otrzymujemy ok. **220 000 litrów** c.w.u. na dobę o temperaturze do 55°C podgrzanej z 80% ciepła skraplania. Jest to ilość prawie dwukrotnie wyższa niż istniejące zapotrzebowanie w obiekcie. Natomiast rysunek 11 przedstawia ilość otrzymanej ciepłej wody użytkowej dla maksymalnie możliwej wydajności chłodniczej. Jest to wartość na poziomie ok. **500 000 litrów**, czyli pięciokrotnie przewyższa ona aktualne zapotrzebowania zakładu na c.w.u.. Nie należy przywiązywać szczególnej uwagi odnośnie tej maksymalnej wartości, ponieważ jak wynika z zapisu w systemie monitoringu ADAP-KOOL[®], bieżące wydajności chłodnicze są znacznie niższe niż zakładane przy projektowaniu instalacji chłodniczej. Tak więc, odzysk ciepła skraplania można ograniczyć do poziomu ok. 50% ciepła z procesu właściwego skraplania (odbior 100% ciepła przegrzania + 50% ciepła właściwego skraplania $Q_k - Q_p$) i wówczas otrzymujemy ok. **150 000 litrów** c.w.u. na dobę (rys. 12). Z tej ilości wody otrzymanej „za darmo” osiągamy oszczędności w energii elektrycznej rzędu 2 149 485 kW rocznie. Mnożąc tą wartość przez 0,2 PLN (średnia cena 1 kW energii elektrycznej) otrzymujemy **430 000 PLN** oszczędności rocznie.

Zmniejszenie ilości ciepła odzyskiwanego z procesu właściwego skraplania par czynnika chłodniczego powoduje bardziej stabilny przebieg tego procesu oraz pozostałych procesów zachodzących w obiegu chłodniczym.

Podsumowując można stwierdzić, że aby otrzymać c.w.u. o temperaturze 55°C w analizowanym obiekcie, należałoby odzyskiwać całość ciepła przegrzania i połowę ciepła z procesu właściwego skraplania. Wówczas otrzymywana „za darmo” ilość ciepłej wody przewyższa nieznacznie średnie zapotrzebowanie na nią w zakładzie. W ten sposób nie byłoby konieczne instalowanie innych źródeł ciepła podgrzewających wodę. Tak więc o wyborze odzysku całości lub części ciepła skraplania decyduje ilość

otrzymywanego ciepła i możliwość jego zagospodarowania. W analizowanym zakładzie rozwiązaniem optymalnym jest odzysk części ciepła skraplania, ponieważ nie istnieje w nim większe zapotrzebowanie na energię cieplną.

4.3 Jakie rozwiązanie można uznać za optymalne w zależności od różnych warunków i przyjmowanych założeń?

Przy wyborze rozwiązania, które będzie najbardziej optymalne, należy wziąć pod uwagę dwa główne czynniki:

- jakie jest zapotrzebowanie na energię cieplną w danym zakładzie,
- ile ciepła można odzyskać z danej instalacji chłodniczej.

W analizowanym obiekcie ilość ciepła odpadowego z urządzeń chłodniczych przewyższa zapotrzebowanie na energię cieplną, która byłaby przeznaczona na podgrzewanie c.w.u.. Kolejne rozważania mogą dotyczyć tego, czy będzie to odzysk samego ciepła przegrzania, co wiąże się z niższymi kosztami instalacji do odzysku ciepła, czy też decydujemy się na odzysk również ciepła skraplania w całości lub częściowo, gdzie koszt instalacji odzysku ciepła jest większy. Związane jest to z bardziej skomplikowanym oprzyrządowaniem w elementy automatyki układu wysokiego ciśnienia danego obiegu chłodniczego.

W Zakładach Mięśnych „SKIBA” można otrzymać następujące ilości c.w.u. w ciągu doby podgrzanej od temperatury +10°C do +55°C (wg rzeczywistych parametrów pracy obiegów odczytanych z systemu ADAP-KOOL[®]):

- **z ciepła przegrzania ok. 30 000 litrów/dobę** – wartość ta nie jest wystarczająca, aby pokryć zapotrzebowanie na c.w.u. i dlatego należałoby zastosować dodatkowe źródło ciepła podgrzewające pozostałą część potrzebnej wody;
- **z 50% ciepła skraplania właściwego i ciepła przegrzania ok. 130 000 litrów/dobę** – wartość ta wystarcza na to, aby pokryć w całości zapotrzebowanie na c.w.u. bez konieczności stosowania dodatkowych źródeł energii cieplnej.

4.3.1 Wnioski odnośnie odzysku ciepła przegrzania

Przeprowadzona ocena odzysku ciepła z samego ciepła przegrzania dla różnych warunków procesu skraplania pozwala na wyciągnięcie następujących wniosków:

- przy 100 000. litrowym zapotrzebowaniu na c.w.u. w ciągu doby, obniżenie temperatury skraplania nie jest wskazane, ponieważ powoduje spadek ilości ciepła odpadowego i zarazem spadek ilości otrzymywanej c.w.u.. Zaletą tego jest polepszenie warunków pracy obiegu chłodniczego (spadek zapotrzebowania na energię elektryczną, wzrost współczynnika wydajności chłodniczej, spadek temperatury tłoczenia – dłuższa żywotność agregatów chłodniczych). Innym, bardzo niekorzystnym czynnikiem jest niska temperatura tłoczenia par czynnika chłodniczego (tabela 4), co nie po-

zwala na uzyskanie zbyt wysokiego poziomu temperatury podgrzewanej wody;

- podwyższenie temperatury skraplania zapewnia nieznaczny wzrost ilości otrzymywanej c.w.u., natomiast powoduje pogorszenie warunków pracy obiegu (wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną, spadek współczynnika wydajności chłodniczej, wzrost temperatury tłoczenia – mniejsza żywotność agregatów chłodniczych). Wzrost ilości ciepła przegrzania i tak nie wystarczy na pokrycie w całości zapotrzebowania na ciepłą wodę;
- najbardziej optymalnym rozwiązaniem odzysku samego ciepła przegrzania jest pozostawienie parametrów skraplania na nominalnym poziomie $t_k = +40^\circ\text{C}$, ponieważ obieg pracuje wówczas w optymalnych warunkach.

Odzysk ciepła przegrzania w analizowanym obiekcie nie jest rozwiązaniem najbardziej optymalnym. Głównym powodem tego jest zbyt mała ilość ciepła, które można odzyskać w porównaniu do jego zapotrzebowania. Odzysk ciepła przegrzania z obiegów chłodniczych pracujących z nowymi czynnikami, takimi jak np. R 404A zastosowany w analizowanym obiekcie nie pozwala na osiągnięcie zbyt wysokiej temperatury końcowej medium odbierającego to ciepło. Jest to spowodowane tym, że nowe czynniki chłodnicze, które zastępują czynnik R 22 nie osiągają zbyt wysokiej temperatury tłoczenia. Jest ona na ogół niższa o ok. 15 do 30 K w porównaniu z temperaturą tłoczenia dla czynnika R 22 dla tej samej temperatury skraplania. Można z tego wnioskować, iż zamienniki R 22 nie pozwalają na odzyskanie ciepła o temperaturze zapewniającej racjonalne wykorzystanie tego ciepła. Dlatego też odzysk ciepła często będzie polegał na wstępnym podgrzewaniu np. wody, która będzie następnie dogrzewana poprzez inne źródło ciepła.

4.3.2 Wnioski odnośnie odzysku ciepła przegrzania wraz z ciepłem właściwego skraplania

Z odzyskiem całości lub części ciepła skraplania wiąże się większe możliwości jego praktycznego wykorzystania. Wynika to z tego, że zwykle ilość ciepła właściwego skraplania jest ok. 8-krotnie większa od ilości samego ciepła przegrzania. Tak więc bardziej racjonalnym rozwiązaniem w analizowanym obiekcie jest odzysk ciepła przegrzania wraz z częścią ciepła skraplania. Taki węzeł odzysku ciepła pozwoli w całości pokryć zapotrzebowanie na energię cieplną, która jest przeznaczona do podgrzewania c.w.u.. Dzięki temu, że w Zakładach Mięsnych „SKIBA” zainstalowane są urządzenia chłodnicze z dwoma różnymi czynnikami (R 22 i R 404A), istnieje możliwość uzyskania końcowej temperatury podgrzewanej c.w.u. na racjonalnie wysokim poziomie, nie wymagającym dogrzewania. Dzieje się tak dlatego, że większa część urządzeń pracuje na czynniku R 22 i dlatego możliwe jest dogrzanie wody do wymaganej temperatury. Częściowy odzysk ciepła skraplania pozwala na zmianę ilości otrzymywanej c.w.u., jeżeli zmieni się na nią zapotrzebowanie. W analizowanym obiekcie nie jest wymagane podwyższanie lub obniżanie

temperatury skraplania, dzięki czemu obiegi chłodnicze mogą pracować na tych samych parametrach po zainstalowaniu w nich węzłów do odzysku ciepła.

Niezależnie od tego, czy zdecydujemy się na odzysk ciepła przegrzania, czy też na preferowany w analizowanym obiekcie częściowy odzysk ciepła skraplania, należy zainstalować w węźle odzysku ciepła zbiornik buforowy przeznaczony do magazynowania podgrzewanej wody. Jest to spowodowane tym, że czas pracy urządzeń chłodniczych nie pokrywa się z okresem, w którym istnieje zapotrzebowanie na c.w.u., ponadto dwuetapowy sposób podgrzewania wody wymusza zastosowanie takiego akumulatora podgrzewanej wody.

LITERATURA:

- [1] Bonca Z., Butrymowicz D., Hajduk T., Targański W.: Nowe czynniki chłodnicze i nośniki ciepła. Własności cieplne, chemiczne i eksploatacyjne. Wyd. MASTA, Gdańsk 2004.
- [2] Kalinowski K., Paliwoda A., Bonca Z., Butrymowicz D., Targański W.: Amoniakalne urządzenia chłodnicze. Podstawy teoretyczne, budowa, działanie. Tom I. Wyd. MASTA, Gdańsk 2000.
- [3] Ullrich H.J.: Technika chłodnicza. Poradnik. Tom 2. Wyd. MASTA, Gdańsk 1999.
- [4] Dauksza A., Gaziński B.: Ekonomia w projektowaniu i eksploatacji instalacji chłodniczych w supermarketach. „Chłodnictwo & Klimatyzacja”, 2004, nr 9.
- [5] Daniewska M.: Odzysk ciepła skraplania czynnika chłodniczego. „Chłodnictwo & Klimatyzacja”, 1996, nr 6.
- [6] Döhlinger M.: Jak można przyczynić się do zaoszczędzenia energii? Lepsze urządzenia, zdrowsze środowisko. „Chłodnictwo & Klimatyzacja”, 1997, nr 1.
- [7] Gazda W., Task M.: Wybrane aspekty wykorzystania ciepła odpadowego ze skraplacza urządzenia chłodniczego do przygotowania c.w.u. „Chłodnictwo & Klimatyzacja”, 2002, nr 11.
- [8] Michałowski M.: Wykorzystanie ciepła skraplania w urządzeniach chłodniczych. „Technika Chłodnicza i Klimatyzacyjna”, 1999, nr 3.
- [9] Paliwoda A.: Oszczędzanie energii w chłodnictwie żywnościowym. „Technika Chłodnicza i Klimatyzacyjna”, 1999, nr 2.
- [10] Staniszewski D., Bonca Z.: Aspekt techniczno-ekonomiczny odzysku ciepła w instalacjach chłodniczych. „Technika Chłodnicza i Klimatyzacyjna”, 2006, nr 1.
- [11] Szczepański R.: Wpływ odzysku ciepła na działanie urządzenia chłodniczego. „Technika Chłodnicza i Klimatyzacyjna”, 2007, nr 3.
- [12] Szczepański R.: Węzły odzysku ciepła w instalacjach chłodniczych. „Technika Chłodnicza i Klimatyzacyjna”, 2007, nr 8.
- [13] Wójcik P., Bonca Z.: Odzysk ciepła w agregacie do schładzania wody lodowej. „Technika Chłodnicza i Klimatyzacyjna”, 2006, nr 2.

