

BARBARA MADEJA-STRUMIŃSKA
ANDRZEJ STRUMIŃSKI
PIOTR ŁUSKA

**ZWIĘKSZENIE BEZPIECZEŃSTWA
ORAZ EFEKTYWNOŚCI KLIMATYZACJI
WYROBISK GÓRNICZYCH STOSUJĄCYCH
PODZIEMNE URZĄDZENIA CHŁODNICZE
DIAGNOZOWANE TERMOWIZYJNIE**

Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej
Wrocław 2006

Publikację wydano w ramach projektu badawczego
Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr 4T12A03527

Opiniodawca

Jan SZŁAZAK

Opracowanie redakcyjne

Alina KACZAK

Skład i łamanie

Tomasz STRUMIŃSKI

Spis treści

1. Wprowadzenie	5
2. Zasady przepływu ciepła	8
2.1. Przewodzenie ciepła	8
2.2. Konwekcja	10
2.3. Promieniowanie ciepła	11
2.4. Złożona wymiana ciepła	14
2.5. Przenikanie ciepła przez przegrodę płaską	15
3. Źródła ciepła w podziemnych wyrobiskach górniczych.....	18
3.1. Sprężanie powietrza kopalnianego w polu sił ciężkości.....	18
3.2. Temperatura skał otaczających wyrobisko górnicze.....	19
3.3. Ciepło generowane przez urządzenia elektromechaniczne	23
3.4. Ciepło generowane przez transportowany urobek	24
3.5. Ciepło parowania wody	25
3.6. Równanie energii przepływającego powietrza w wyrobiskach górniczych.....	26
4. Pomiar temperatury powietrza kopalnianego i lokalnych źródeł ciepła w kopalniach podziemnych.....	28
5. Stan zagrożenia klimatycznego kopalń węgla kamiennego i rud miedzi.....	36
5.1. Warunki termiczne w kopalniach Górnośląskiego Zagłębia Węglowego	36
5.2. Warunki termiczne w kopalniach rud miedzi w LGOM-ie.....	37
5.3. Warunki termiczne w kopalni Bogdanka.....	39
6. Ocena zagrożenia klimatycznego	41
7. Zwalczanie zagrożenia klimatycznego	44
8. Charakterystyka urządzeń chłodniczych powietrza kopalnianego stosowanych w polskim górnictwie podziemnym	48
8.1. Urządzenia chłodnicze typu LKM	48
8.1.1. Chłodziarki bezpośredniego działania typu LKM	48
8.1.2. Urządzenia chłodnicze pośredniego działania typu LKM	51
8.2. Urządzenia chłodnicze typu DV	52
8.2.1. Chłodziarki bezpośredniego działania typu DV	52
8.2.2. Urządzenia chłodnicze pośredniego działania typu IDV	55
8.3. Urządzenia chłodnicze typu TS	57
8.3.1. Chłodziarki bezpośredniego działania typu TS	57
8.3.2. Urządzenia chłodnicze pośredniego działania typu TS	60
9. Systemy klimatyzacyjne kopalń podziemnych	63
9.1. Klimatyzacja lokalna	63

9.2. Klimatyzacja grupowa	76
9.3. Centralna klimatyzacja w KWK Pniówek	82
9.4. Centralna klimatyzacja w O/ZG Rudna	83
9.5. Klimatyzacja stanowiskowa w kopalniach rud miedzi	85
10. Stacja prób górniczych chłodziarek powietrza kopalnianego	87
10.1. Charakterystyka stacji prób	87
10.2. Działanie stacji prób	88
10.3. Wyposażenie stacji prób	92
11. Ogólne zasady diagnozowania urządzeń technicznych	95
12. Diagnostyka termowizyjna obiektów technicznych	99
13. Emisyjność elementów chłodziarek powietrza kopalnianego oraz materiałów użytych do ich budowy	102
14. Zobrażenia termalne kopalnianych urządzeń chłodniczych powietrza kopalnianego...	114
15. Ocena pracy urządzeń chłodniczych bezpośredniego działania na podstawie badań termowizyjnych	119
16. Prognozowanie stanu technicznego chłodziarek powietrza kopalnianego	129
17. Techniczne, organizacyjne i ekonomiczne aspekty stosowania chłodziarek powietrza kopalnianego	135
Literatura	139

1. Wprowadzenie

Głębokość eksploatacji kopalin użytecznych wpływa w istotny sposób na pogorszenie warunków pracy załóg podziemnych zakładów górniczych. Wraz ze zwiększaniem głębokości eksploatacji złóż węglowych, rudnych i solnych nasila się występowanie zagrożeń naturalnych.

Do niebezpiecznych zagrożeń zalicza się zagrożenia litologiczne, które przejawiają się tapaniami, zawałami i wyrzutami gazów i skał. Zwalczanie tych zagrożeń wymaga wielu kosztownych zabiegów technicznych i organizacyjnych. Do bardzo groźnych zagrożeń zalicza się także zagrożenia aerologiczne. Pożary podziemne oraz wybuchy gazów, przede wszystkim metanu i pyłu węglowego zarówno w polskich, jak i zagranicznych kopalniach podziemnych są przyczyną wielu katastrof górniczych. Wymienione zagrożenia, pomimo sporadycznego ich występowania, warunkują metody prewencyjne w kopalniach węgla kamiennego, rud miedzi i soli kamiennej. Przede wszystkim metody te są ukierunkowane na zapobieganie katastrofalnym zdarzeniom. W związku z tym stosuje się odpowiednie technologie podziemnej eksploatacji złóż kopalin użytecznych, techniki wykrywania występujących zagrożeń i ich monitoring, a także odpowiednią organizację pracy.

Pośród zagrożeń aerologicznych na wyróżnienie zasługuje zagrożenie temperaturowe. Temperatura powietrza kopalnianego jest głównym czynnikiem kształtującym klimat w podziemnych wyrobiskach górniczych. Panujący mikroklimat określa warunki pracy załóg górniczych w miejscach pracy.

Temperatura powietrza kopalnianego wiąże się z temperaturą górotworu, głębokością zalegania wyrobiska, występowaniem lokalnych źródeł ciepła, utlenianiem skał, desorpcją gazów, parującą wilgocią itp.

Podstawową rolę odgrywa tutaj jednak głębokość zalegania wyrobiska oraz temperatura pierwotna górotworu, przy czym im głębiej jest zlokalizowane wyrobisko górnicze i im wyższa jest temperatura pierwotna skał otaczających wyrobisko, tym należy spodziewać się wyższej temperatury powietrza kopalnianego.

Temperatura pierwotna skał jest zależna od ciepła płynącego z wnętrza Ziemi w kierunku do jej powierzchni. Ciepło wytwarzane we wnętrzu Ziemi jest wynikiem zachodzenia wielu procesów, takich jak: przemiany jądrowe, geochemiczne, grawitacyjne, krystalizacyjne itp. Jednym z podstawowych źródeł ciepła powstającego we

wnętrzu Ziemi jest rozpad rozproszonych w skorupie ziemskiej pierwiastków promieniotwórczych.

Ciągłe zwiększanie głębokości eksploatacji złóż kopalin jest przyczyną pogarszających się warunków pracy podziemnych załóg górniczych.

Zagrożenie temperaturowe w kopalniach głębokich ma zupełnie inny charakter niż wymienione zagrożenia naturalne. W odróżnieniu od jednorazowych, ekstremalnych skutków takich zagrożeń, jak np. tąpnięcie, wybuch gazów lub pyłu węglowego, zagrożenie temperaturowe oddziałuje na załogę w sposób ciągły. Załoga dołowa w trudnych warunkach klimatycznych pracuje albo pełny wymiar godzinowy dniówki roboczej (do 28 °C), albo w cyklu skróconym do 6 godzin, gdy temperatura sucha powietrza kopalnianego jest wyższa od 28 °C, a nie przekracza 33 °C.

Praca ciągła w takich warunkach sprzyja powstawaniu różnych chorób, a nawet niekiedy bywa przyczyną udarów cieplnych [58]. Niekorzystne warunki termiczne w kopalniach podziemnych nie tylko mają ujemny wpływ na zdrowie załogi, ale w sposób istotny wpływają na zmniejszenie wydajności pracy i wydobycia kopaliny. Jest to niekiedy główną przyczyną zmniejszenia efektywności ekonomicznej podziemnego zakładu górniczego.

Do głównych sposobów zwalczania zagrożenia temperaturowego w kopalniach podziemnych zalicza się zwiększenie intensywności przewietrzania wyrobisk górniczych oraz sztuczne ochładzanie powietrza kopalnianego.

Pierwszy z wymienionych sposobów bywa skuteczny tylko w wyjątkowych okolicznościach, tzn. tylko wtedy, gdy kopalnia dysponuje określonymi rezerwami powietrza wentylacyjnego. W większości podziemnych zakładów górniczych praktycznie nie ma takich rezerw. Dlatego też następuje szybki rozwój klimatyzowania wyrobisk górniczych przy korzystaniu ze specjalnych urządzeń chłodniczych. W kopalniach węgla kamiennego oraz rud miedzi pracuje obecnie około 150 lokalnych urządzeń chłodniczych i dwie klimatyzacje centralne, jedna w kopalni węgla Pniówek i jedna w kopalni rudy miedzi Rudna.

Lokalne chłodziarki powietrza są to przede wszystkim urządzenia o działaniu bezpośrednim, tzn. urządzenia do bezpośredniego ochładzania powietrza kopalnianego przepływającego przez te urządzenia. Chłodziarki te pracują na dużych głębokościach w trudnych warunkach geologiczno-górniczych, często ulegają awariom, co zwykle powoduje zaburzenie procesu technologicznego w kopalni.

Usuwanie większości awarii podziemnych urządzeń chłodniczych jest na ogół skomplikowane, wymagające ich demontażu oraz dokonywania remontów w specjalistycznych zakładach naprawczych zlokalizowanych poza terenem kopalni.

W ramach projektu badawczego 4T12A03527 Ministra Edukacji i Nauki przeprowadzono badania w zakresie możliwości zwiększenia bezpieczeństwa oraz efektywności klimatyzacji wyrobisk górniczych stosujących podziemne urządzenia chłodnicze ze szczególnym uwzględnieniem diagnozowania pracy tych urządzeń na podstawie badań termowizyjnych.

Bezpośrednią konsekwencją termowizyjnej diagnostyki termalnej jest bieżąca informacja o poprawności lub wadliwości działania poszczególnych podzespołów stosowanych w kopalni chłodziarek powietrza kopalnianego. Systematyczna kontrola tych urządzeń umożliwia wczesne wykrywanie zmniejszenia efektywności ich działania, np. na skutek zanieczyszczenia, zużycia lub rozszczelnienia określonych elementów chłodziarki. Umożliwia to m.in. podejmowanie odpowiednich środków profilaktycznych w celu uniknięcia uciążliwych i kosztownych awarii.

Zastosowanie termowizyjnej diagnostyki termalnej chłodziarek powietrza kopalnianego umożliwia wykrycie miejsc potencjalnych zagrożeń ewentualnych awarii na tyle wcześnie, że można zaplanować określone prace remontowe w takim czasie, aby uniknąć kosztownych przestojów produkcji, czy też niespodziewanego pogorszenia warunków pracy w tych rejonach kopalni, gdzie nastąpiło unieruchomienie urządzeń chłodniczych.

2. Zasady przepływu ciepła

Procesy cieplne zachodzące w podziemnych zakładach górniczych często wpływają niekorzystnie na warunki pracy załóg górniczych. Powodują one nadmierny wzrost temperatury powietrza kopalnianego oraz jego zawilgocenia.

W celu ochrony pracowników przed negatywnymi skutkami trudnych termicznych warunków pracy w przodkach udostępniających, przygotowawczych lub eksploatacyjnych górnicze przepisy bezpieczeństwa pracy [47] określają wartości graniczne temperatury powietrza kopalnianego, w której możliwa jest bezpieczna praca górnicza. Jak to już wcześniej wspomniano, granicznymi wartościami temperatury powietrza zmierzonej termometrem suchym są 28 i 33 °C, odpowiednio dla pracy ośmio- i sześciogodzinnej, przy czym intensywność chłodzenia powietrza powinna być większa od jedenastu katastopni wilgotnych.

Wymiana ciepła między górotworem, urządzeniami energetycznymi a przepływającym powietrzem w wyrobiskach górniczych odbywa się trzema drogami: przez przewodzenie, unoszenie (konwekcję) i promieniowanie [22, 38, 61].

2.1. Przewodzenie ciepła

Przewodzenie ciepła odbywa się w ciałach stałych, cieczech i gazach. Polega ono na przekazywaniu energii wewnątrz ośrodka materialnego lub z jednego ośrodka do drugiego przez bezpośrednio stykające się drobiny i atomy, lub przez dyfuzję swobodnych elektronów z miejsc o temperaturze wyższej do miejsc o temperaturze niższej [22, 61].

W ciałach stałych przewodzenie ciepła jest skutkiem drgań sieci krystalicznej oraz przemieszczania się swobodnych elektronów w ciałach będących przewodnikami prądu elektrycznego. W cieczech i gazach ruchy cząstek podłużne, obrotowe i wibracyjne powodują pośrednio przenoszenie ciepła z obszarów o wyższej temperaturze do obszarów o niższej temperaturze przez przekazywanie energii kinetycznej (zderzenia).

Przewodzenie jest podstawową drogą wymiany ciepła w cieczech i gazach nie poruszających się, tj. przy braku przepływu [22, 61].

Procesy wymiany ciepła mogą być ustalone lub nieustalone. Ustalona wymiana ciepła występuje wówczas, gdy pole temperatury układu nie ulega zmianie w czasie. W procesie nieustalonej wymiany ciepła pole temperatury i ilość wymienianego ciepła są funkcjami czasu.

W zależności od liczby współrzędnych przestrzeni, w kierunku których zmienia się temperatura, pole temperatury i przewodzenie ciepła jest jednowymiarowe, dwuwymiarowe lub trójwymiarowe [22].

Przewodzenie ciepła opisuje równanie Fouriera

$$\dot{q} = -\lambda_s \text{grad } \vartheta, \quad (2.1)$$

gdzie:

\dot{q} – gęstość strumienia ciepła, W/m^2 ,

λ_s – współczynnik przewodzenia ciepła, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,

$\text{grad } \vartheta$ – gradient temperatury w kierunku przepływu ciepła, K/m , przy czym

$$\text{grad } \vartheta = \mathbf{i} \frac{\partial \vartheta}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial \vartheta}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial \vartheta}{\partial z}. \quad (2.2)$$

W zależności (2.2) \mathbf{i} , \mathbf{j} , \mathbf{k} oznaczają odpowiednie wersory.

Równanie (2.1) jest słuszne dla założenia, że ośrodek, w którym ciepło jest przewodzone jest jednorodny i izotropowy.

Współczynnik λ_s przewodzenia ciepła ma największą wartość dla metali, przy czym zmniejsza się on w miarę wzrostu temperatury. Najmniejsze wartości współczynnika λ_s występują w przypadku gazów. Współczynnik ten zwiększa się wraz ze wzrostem temperatury.

Wartości współczynników λ_s przewodzenia ciepła dla skał polskich zagłębi górniczych zestawiono w tabeli 2.1 [31, 61].

Tabela 2.1. Współczynniki przewodzenia ciepła λ_s dla skał polskich zagłębi górniczych (wg [31, 61])

Rodzaj skał	Górnośląskie Zagłębie Węglowe	Dolnośląskie Zagłębie Węglowe	Lubelskie Zagłębie Węglowe	Lubińsko- -Głogowskie Zagłębie Miedzi
	wartość współczynnika λ_s , $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$			
Zlepieńce i żwirowce	3,4	2,3	–	–
Piaskowce gruboziarniste	3,5	3,4	4,04	2,3
Piaskowce drobnoziarniste	3,1	2,9	2,5	–
Łupki piaszczyste	2,2	2,5	–	–
Łupki ilaste	2,1	1,9	2,5	–
Węgle kamienne	0,60	0,66	0,4	–
Wapień	–	–	2,8	3,0
Kreda piszcząca	–	–	1,8	–
Dolomit	–	–	–	2,5
Margle miedzionośne	–	–	–	2,5

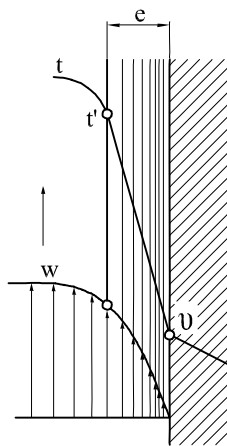
2.2. Konwekcja

Konwekcja (unoszenie) polega na przenoszeniu energii przede wszystkim przez przepływ i mieszanie się strug ośrodków płynnego lub gazowego o różnej temperaturze.

W konwekcji współuczestniczą cztery wzajemnie powiązane zjawiska [22, 38, 61]:

- przewodzenie ciepła z powierzchni ciała stałego do bezpośrednio przylegających cząstek płynu lub gazu,
- absorpcja i utrzymywanie tak przekazanego ciepła przez cząstki skutkujące we wzroście ich energii,
- migracja cząstek o zwiększonej energii do obszarów o niższej temperaturze, powodująca wymianę części tej energii,
- transport energii przez przepływ ośrodka.

Duże znaczenie praktyczne w podziemiach kopalni ma wymiana ciepła między ociosami wyrobisk górniczych oraz elementami urządzeń energomechanicznych a przepływającymi strumieniami powietrza w tych wyrobiskach. Wymiana ciepła wywiera decydujący wpływ na wartość temperatury powietrza kopalnianego w wyrobiskach górniczych, a zwłaszcza w miejscach pracy załogi. Podczas przepływu powietrza wzdłuż stałej ścianki (np. ociosu wyrobiska) przy jej powierzchni wytwarza się laminarna warstwa przyścienna, w której wymiana ciepła przebiega w drodze przewodnictwa (rys. 2.1). W wymienionej warstwie wymiana ciepła jest mniej intensywna niż w strumieniu powietrza oddalonym od ścianki, gdzie występuje także konwekcja.



Rys. 2.1. Rozkład temperatury przy powierzchni przegrody

Opis zjawiska konwekcji ujmuje równanie Newtona

$$\dot{Q} = \alpha A(\vartheta - t), \quad (2.3)$$

gdzie:

- \dot{Q} – strumień ciepła oddawany przez powierzchnię A , W,
- α – współczynnik przyjmowania ciepła (konwekcji), $W/(m^2 \cdot K)$,
- A – pole powierzchni, z której oddawane jest ciepło, m^2 ,
- ϑ – temperatura powierzchni ścianki, K,
- t – temperatura średnia strugi płynu, K.

Wyznaczenie współczynnika α przyjmowania ciepła jest trudne, gdyż jego wartość zależy często m.in. od kształtu i wielkości ciała, chropowatości jego powierzchni, rodzaju przepływu płynu, przewodności cieplnej przepływającego ośrodka, jego gęstości itp. Dlatego też wartości współczynnika przyjmowania ciepła α są na ogół wyznaczone eksperymentalnie dla różnych ciał.

Najmniejsze wartości współczynników α wynoszące $0,1\text{--}500 W/(m^2 \cdot K)$ występują w gazach, natomiast dla cieczy niewrzających α wynosi $500\text{--}7000 W/(m^2 \cdot K)$, a dla cieczy wrzących $2000\text{--}10\,000 W/(m^2 \cdot K)$ [22, 61], a nawet do $100\,000 W/(m^2 \cdot K)$.

2.3. Promieniowanie ciepła

Promieniowanie ciepła polega na przekazywaniu energii przez kwanty promieniowania elektromagnetycznego. Promieniowanie ciepła nie wymaga ośrodka materialnego i może się ono rozchodzić w próżni.

Temperatura promieniowania ciał stałych, ciekłych oraz niektórych gazów jest związana z tym, że część ich energii wewnętrznej (lub entalpii) przemienia się na energię fal elektromagnetycznych.

Zjawisko wysyłania energii za pośrednictwem fal nosi nazwę emisji promieniowej.

Wszystkie ciała w temperaturze wyższej od zera bezwzględnego emitują promieniowanie elektromagnetyczne, nazywane także promieniowaniem cieplnym lub termicznym. Widmo tego promieniowania zależy od wartości temperatury emitera i dla temperatury mniejszej od $700\text{ }^\circ\text{C}$ mieści się całkowicie w zakresie podczerwieni i mikrofal [22, 38].

Idealny emiter promieniowania nazywany jest ciałem doskonale czarnym (lub ciałem czarnym). Jest to takie wyidealizowane ciało, które pochłania każde promieniowanie padające.

Ciało czarne promieniuje zgodnie z prawem Plancka [38]

$$M_{\lambda C} = \frac{c_1}{\lambda} \left[\exp \frac{c_2}{\lambda T} - 1 \right]^{-1} d\lambda, \quad (2.4)$$

gdzie:

$M_{\lambda C}$ – moc promieniowania (egzytancja) wyemitowana przez jednostkę powierzchni ciała czarnego w kąt bryłowy półpełny, $W/(m^2 \cdot \mu m)$,

λ – długość fali emitowanego promieniowania, μm ,

$c_1 = 2\pi h c^2 = 3,7417749 \cdot 10^8 W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^4$ – pierwsza stała promieniowania Plancka,

$c_2 = hc/k = 4387,69 \mu m \cdot K$ – druga stała promieniowania Plancka,

$h = 6,626 \cdot 10^{-34} J \cdot s$ – stała Plancka,

$k = 1,381 \cdot 10^{-23} J/K$ – stała Boltzmanna,

$c = 2,9979 \cdot 10^8 m/s$ – prędkość rozchodzenia się fali elektromagnetycznej.

Z ekstremum funkcji (2.4) można uzyskać zależność [38, 40, 61]

$$\lambda_m T = 2898 \mu m \cdot K, \quad (2.5)$$

która nazywa się prawem przesunięć Wiena – iloczyn temperatury T i długości fali λ_m ma stałą wartość.

Całkowitą wyemitowaną moc promieniowania M (całkowitą egzytancję) ciała czarnego oblicza się przez całkowanie równania (2.4) w przedziale od zera do nieskończoności, co wyrażone jest przez prawo Stefana–Boltzmanna

$$M = \sigma T^4 \quad (2.6)$$

gdzie $\sigma = 5,66943 \cdot 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$ oznacza stałą Stefana–Boltzmanna.

Ze wzoru (2.6) wynika, że całkowita moc emitowana przez ciało czarne jest proporcjonalna do czwartej potęgi jego temperatury bezwzględnej.

W dziedzinach technicznych wzór (2.6) często jest wyrażony w postaci [22, 61]

$$\dot{q}_C = C_0 \left(\frac{\Theta}{100} \right)^4, \quad (2.7)$$

gdzie \dot{q}_C oznacza jednostkowe ciepło promieniowania ciała doskonale czarnego W/m^2 , Θ – temperaturę bezwzględną, a stała $C_0 = 5,67 W/(m^2 \cdot K^4)$.

Ciepło \dot{Q} (J/s) wypromieniowane przez powierzchnię A tego ciała w jednostce czasu wynosi

$$\dot{Q} = AC_0 \left(\frac{\Theta}{100} \right)^4. \quad (2.8)$$

Ciała rzeczywiste nie są ciałami doskonale czarnymi i w tej samej temperaturze wypromieniowują mniej energii niż ciało doskonale czarne, co określa współczynnik emisyjności ε_λ , który ma wartość mniejszą od jedności.

W rzeczywistości ciała stałe częściowo pochłaniają, częściowo odbijają i częściowo przepuszczają promieniowanie elektromagnetyczne, a zatem również promieniowanie cieplne. W związku z tym wprowadza się współczynniki α_λ , ρ_λ i τ_λ , przy czym [14, 38, 40, 48]:

- α_λ – współczynnik absorpcji (pochłaniania) określa, jaka część energii napromieniowującej powierzchnię zostaje zaabsorbowana,
- ρ_λ – współczynnik odbicia (refleksyjności) określa, jaka część energii napromieniowującej powierzchnię zostaje odbita,
- τ_λ – współczynnik przepuszczalności (transmisji) określa zdolność ciała do przepuszczania energii napromieniowującej jego powierzchnię.

Wyrażenie zdefiniowane zależnością

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1 \quad (2.9)$$

jest nazywane prawem Kirchhoffa [14, 40, 48].

Wartości wymienionych współczynników zależą w dużej mierze od długości fali i są także funkcją temperatury badanego obiektu.

Dla materiałów nieprzezroczystych, z którymi najczęściej spotykamy się w górnictwie, współczynnik $\tau_\lambda = 0$ i równanie (2.9) upraszcza się do postaci

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda = 1. \quad (2.10)$$

Wspomniany poprzednio współczynnik emisyjności ε_λ jest zdefiniowany jako iloraz energii wyemitowanej przez dane ciało M_λ do energii wyemitowanej przez ciało czarne $M_{\lambda c}$ o tej samej temperaturze [14, 40]

$$\varepsilon_\lambda = \frac{M_\lambda}{M_{\lambda c}}. \quad (2.11)$$

Współczynnik emisyjności zależy od rodzaju ciała, jego temperatury, długości fali promieniowania, kierunku obserwacji, polaryzacji oraz od stanu powierzchni (polerowana, matowa) jego wartość waha się od 0,02 do 0,98 [40, 48].

Wyniki badań emisyjności niektórych ciał, przeprowadzonych w ramach projektu badawczego 4T12A03527, przedstawiono w rozdziale 13 niniejszej monografii.

Ze względu na właściwości emisyjne ciała dzieli się na: czarne, szare i promieniujące selektywnie [14, 40, 48]:

- ciało czarne, dla którego $\varepsilon_\lambda = \varepsilon = 1$,
- ciało szare, dla którego $\varepsilon_\lambda = \varepsilon = \text{const} < 1$,
- ciało promieniujące selektywnie, dla którego ε zależy od długości fali.

Biorąc pod uwagę wzór (2.11), uzyskuje się dla ciał szarych zależność

$$M_{\lambda} = \varepsilon M_{\lambda c}, \quad (2.12)$$

natomiast całkowita egzytancja dla takiego ciała jest dana wzorem

$$M = \varepsilon \sigma T^4. \quad (2.13)$$

Ciepło natomiast wypromieniowane przez powierzchnię A ciała szarego można obliczyć z zależności

$$\dot{Q}_{sz} = \varepsilon A C_0 \left(\frac{\Theta}{100} \right)^4. \quad (2.14)$$

Wymiana ciepła między dwoma powierzchniami ustawionymi naprzeciw siebie może być wyznaczona z równania

$$\dot{Q}_{1-2} = \varepsilon_{1-2} A_1 C_0 \left[\left(\frac{\Theta_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{\Theta_2}{100} \right)^4 \right], \quad (2.15)$$

w którym:

A_1 – pole powierzchni ciała o temperaturze Θ_1 ,

Θ_1, Θ_2 – temperatura bezwzględna ciał wymieniających ciepło,

ε_{1-2} – zastępcza zdolność emisji między dwoma równoległymi powierzchniami, przy czym

$$\varepsilon_{1-2} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (2.16)$$

Wartość ε_{1-2} jest na ogół mniejsza zarówno od ε_1 jak też od ε_2 . W szczególnym przypadku wartość ε_{1-2} może wynosić ε_1 , gdy $\varepsilon_2 = 1$ lub ε_2 , jeśli $\varepsilon_1 = 1$. Jeżeli obie powierzchnie wymieniające energię promienistą są czarne, to $\varepsilon_{1-2} = 1$.

2.4. Złożona wymiana ciepła

Wymiana ciepła w drodze samego przewodzenia, promieniowania lub samej konwekcji w praktyce, zwłaszcza w praktyce górniczej, występuje bardzo rzadko. Najczęściej wspomniane trzy rodzaje wymiany ciepła występują jednocześnie w różnych kombinacjach. Częstym przypadkiem jest równoczesne występowanie promieniowania i konwekcji. W takim przypadku dla ścianki stałej wprowadza się zastępczy współczynnik wymiany ciepła przez promieniowanie α_r , który wyznacza się ze wzoru

$$\alpha_r = \frac{\dot{Q}_{1-2}}{A_1(\Theta_1 - \Theta_0)}, \quad (2.17)$$

gdzie:

\dot{Q}_{1-2} – strumień ciepła wymieniony przez promieniowanie, wyznaczony z zależności (2.15),

Θ_1 – temperatura ścianki,

Θ_0 – temperatura odniesienia.

W razie jednoczesnej konwekcji i promieniowania za temperaturę odniesienia przyjmuje się zwykle temperaturę średnią strugi płynu ($\Theta_0 = T$).

Kojarząc równania (2.15) i (2.17), otrzymuje się ostatecznie następujący wzór określający zastępczy współczynnik α_r ,

$$\alpha_r = \frac{\varepsilon_{1-2} C_0 \left[\left(\frac{\Theta_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{\Theta_2}{100} \right)^4 \right]}{\Theta_1 - T}. \quad (2.18)$$

Zagęszczenie strumienia ciepła wymienionego przez konwekcję i promieniowanie można wyznaczyć z zależności

$$\dot{q}_A = (\alpha + \alpha_r)(\vartheta - t) \quad (2.19)$$

przy czym α oznacza współczynnik przejmowania ciepła, α_r – współczynnik wymiany ciepła promieniowania obliczony ze wzoru (2.18), ϑ i t natomiast oznaczają odpowiednio temperaturę ścianki i płynu.

2.5. Przenikanie ciepła przez przegrodę płaską

Ważnym dla praktyki górniczej jest przepływ ciepła z jednego ośrodka do drugiego przez przegrodę płaską, np. tamę pożarową. W tym przypadku wymiana ciepła polega na przejmowaniu ciepła przez przegrodę, np. od płynu o wysokiej temperaturze t_1 (np. gazów pożarowych), przewodzeniu ciepła przez przegrodę grubości δ oraz przejmowaniu ciepła od przegrody przez płyn o niższej temperaturze t_2 (np. strumień powietrza kopalnianego). Wymiana ciepła między przegrodą może się odbywać przez konwekcję lub konwekcję i promieniowanie. Ten sposób wymiany ciepła nosi nazwę przenikania ciepła przez przegrodę płaską. Przyjmując, że temperatury powierzchni płaskiej są stałe i wynoszą ϑ_1 i ϑ_2 oraz iż wymiana ciepła jest ustalona, można napisać następujące równania opisujące wymianę ciepła przez przejmowanie między przegrodą a obu płynami

$$\dot{Q} = \alpha_1 A_1 (t_1 - \vartheta_1), \quad (2.20)$$

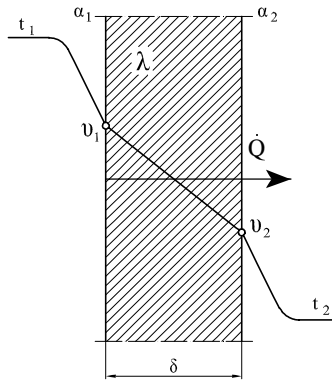
$$\dot{Q} = \alpha_2 A_2 (\vartheta_2 - t_2), \quad (2.21)$$

gdzie A_1 i A_2 oznaczają odpowiednio pola powierzchni przegrody po stronie płynu cieplejszego i zimniejszego.

Jeśli przegroda płaska $A_1 = A_2 = A = \text{idem}$ jest wykonana z materiału jednorodnego, dla którego λ nie zależy od temperatury ($\lambda = \text{idem}$), to na podstawie równania Fouriera [22, 61] dla ustalonego przepływu ciepła można napisać wzór

$$\frac{d\vartheta}{dx} = -\frac{\dot{Q}}{A\lambda} = \text{idem}, \quad (2.22)$$

gdzie x oznacza współrzędną grubości przegrody (rys. 2.2).



Rys. 2.2. Przenikanie ciepła przez przegrodę płaską

Po scałkowaniu równania (2.22) w granicach od x_1 do x_2 oraz po przyjęciu $x_2 - x_1 = \delta$ otrzymujemy wzór

$$\dot{Q} = \frac{\lambda A}{\delta} (\vartheta_1 - \vartheta_2). \quad (2.23)$$

Dla przegród niepłaskich wzór (2.23) przyjmuje postać

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{\delta} A_0 \Psi (\vartheta_1 - \vartheta_2), \quad (2.24)$$

gdzie Ψ oznacza współczynnik zależny od kształtu przegrody przewodzącej ciepło, przy czym dla przegrody płaskiej $\Psi = 1$. Powierzchnia A_0 jest powierzchnią odniesienia, według której oblicza się wymianę ciepła.

Przekształcając odpowiednio równania (2.20), (2.21) i (2.24), można wyznaczyć następujące różnice temperatur:

$$t_1 - \vartheta_1 = \frac{\dot{Q}}{\alpha_1 A_1}, \quad (2.25)$$

$$t_2 - t_2 = \frac{\dot{Q}}{\alpha_2 A_2}, \quad (2.26)$$

$$t_1 - t_2 = \frac{\dot{Q}}{\Psi A_0} \frac{\delta}{\lambda}. \quad (2.27)$$

Po zsumowaniu stronami równań (2.25), (2.26) i (2.27) oraz przekształceniu odpowiednio otrzymanych wyrażen można uzyskać zależność

$$\dot{Q} = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{\alpha_1 A_1} + \frac{1}{\Psi A_0} \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2 A_2}}. \quad (2.28)$$

Równanie (2.28) ujmuje się często w postaci wzoru Pecleta

$$\dot{Q} = k A_0 (t_1 - t_2), \quad (2.29)$$

w którym zależność

$$k = \frac{1}{\frac{A_0}{\alpha_1 A_1} + \frac{\delta}{\Psi \lambda} + \frac{A_0}{\alpha_2 A_2}} \quad (2.30)$$

nosi nazwę współczynnika przenikania ciepła.

Jeśli przegroda odgraniczająca dwa wymienione płyny jest płaska, przy czym $A_0 = A_1 = A_2$, to równania (2.28) i (2.30) mają postać

$$\dot{Q} = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{\alpha_1 A_0} + \frac{\delta}{\lambda A_0} + \frac{1}{\alpha_2 A_0}} \quad (2.31)$$

oraz

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (2.32)$$

przy czym jednostką wymiarową współczynnika przenikania ciepła jest $[k] = \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

3. Źródła ciepła w podziemnych wyrobiskach górniczych

Temperaturę powietrza w kopalniach podziemnych określają przede wszystkim takie czynniki, jak głębokość złoża, z czym wiąże się proces sprężania powietrza w polu sił ciężkości, a także ciepło i wilgoć oddawana przez górotwór, urządzenia mechaniczne i elektryczne oraz transportowany urobek.

W niektórych przypadkach znaczącą rolę przy wzroście temperatury powietrza kopalnianego mogą odgrywać takie lokalne źródła ciepła, jak: proces utleniania skał, desorpcja metanu, obecność rurociągów wodnych i powietrza sprężonego, parująca w wyrobisku woda itp. [31, 61].

W dalszej części monografii omawia się główne źródła ciepła generowanego w kopalniach podziemnych.

3.1. Sprężanie powietrza kopalnianego w polu sił ciężkości

Powietrze atmosferyczne wpływające do kopalń przechodzi z niższego ciśnienia barometrycznego na powierzchni do ciśnienia wyższego panującego w podziemiach kopalni. W czasie tego przepływu powietrze ulega określonym przemianom termodynamicznym, jest to zwłaszcza przemiana politropowa określona równaniem [22]

$$pv^\nu = \text{idem}, \quad (3.1)$$

gdzie:

v – objętość właściwa powietrza, m^3/kg ,

$\nu = \text{idem}$ – wykładnik politropy, przy czym dla przemiany:

- izotermicznej ($t = \text{idem}$) – $\nu = 1$,
- izochorycznej ($v = \text{idem}$) – $\nu = \infty$,
- izobarycznej ($p = \text{idem}$) – $\nu = 0$,
- izentropowej ($dq_c = 0$, brak wymiany ciepła) – $\nu = c_p/c_v$ dla powietrza $\kappa = c_p/c_v = 1,40$,

c_p – właściwa pojemność cieplna pod stałym ciśnieniem, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$,

c_v – właściwa pojemność cieplna o stałej objętości, J/(kg · K).

Z równania politropy (3.1) i po uwzględnieniu równania stanu gazów doskonałych

$$p\nu = RT, \quad (3.2)$$

w którym p (Pa) oznacza ciśnienie powietrza, R (J/(kg · K)) – indywidualną stałą gazową (dla powietrza suchego $R = 287,04$ J/(kg · K)), T (K) – temperaturę bezwzględną tego powietrza, dla dwóch przekrojów krańcowych wyrobiska można uzyskać zależność [2]

$$\text{grad } T = \frac{z_1 - z_2}{T_2 - T_1} = \frac{R}{g} \frac{\nu}{\nu - 1}. \quad (3.3)$$

Gradientem temperatury nazywa się liczbę metrów głębokości ($z_1 - z_2$) odpowiadającą wzrostowi temperatury powietrza ($T_2 - T_1$) o 1 °C (1 K) [2].

Ze wzoru (3.3) wynika, że gradient temperatury w wyrobisku górniczym zależy od rodzaju przemiany termodynamicznej zachodzącej w tym wyrobisku, przy czym dla:

- atmosfery izotermicznej ($\nu = 1$) $\text{grad } T = \infty$ m/K,
- atmosfery izochorycznej ($\nu = \infty$) $\text{grad } T = 29,27$ m/K,
- atmosfery izentropowej (adiabatyecznej $\nu = 1,40$) $\text{grad } T = 102,44$ m/K.

Jeśli więc bierze się pod uwagę tylko przemianę adiabatyczną, to wzrost ciśnienia barometrycznego przy wzroście głębokości o każde 100 m (102,44 m) powoduje przyrost temperatury powietrza o 1 K. W czasie wznoszącego przepływu powietrza (np. wypływu z kopalni) zachodzi zjawisko przeciwne, tzn. zmniejszanie się ciśnienia barometrycznego powoduje obniżanie temperatury powietrza.

W praktyce kopalń węgla i rud miedzi przemiany termodynamiczne zachodzące w czasie przepływu powietrza wyrobiskami górniczymi zwykle odbiegają od przemiany adiabatycznej i dlatego wartości gradientów temperatury mogą odbiegać od wymienionych gradientów. Badania prowadzone w kopalniach rud miedzi [36] wykazały, że w szybach wdechowych tych kopalń temperatura powietrza wzrasta o 0,6–0,8 K na każde 100 m głębokości szybu.

3.2. Temperatura skał otaczających wyrobisko górnicze

W celu określenia wpływu temperatury skał na temperaturę powietrza kopalnianego wychodzi się z prawa Fouriera [31, 61]. Zakłada się przy tym, że pole temperatury skał jest symetryczne względem osi s wyrobiska i nie zależy od kąta kierunkowego współrzędnych walcowych φ . Jednocześnie zakłada się także, iż temperatura ścianki wyrobiska dla ustalonej wartości współrzędnej s w każdym punkcie obwodu wyrobiska jest taka sama. Pomija się również ciepło przewodzone w kierunku równoległym

do osi wyrobiska. Przy takich założeniach równanie bilansu ciepła w skałach wyrażone we współrzędnych cylindrycznych przyjmuje postać [31, 61]

$$\frac{\partial \vartheta(r, s, \tau)}{\partial \tau} = a \left[\frac{\partial^2 \vartheta(r, s, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \vartheta(r, s, \tau)}{\partial r} \right], \quad (3.4)$$

gdzie:

ϑ – temperatura skał, °C,

r – promień wodzący (równoważny) wyrobiska, m,

τ – czas, s,

a – współczynnik przewodnictwa temperaturowego skał, m²/s.

Zmienne niezależne przyjmują wartości z przedziałów:

$$r_0 \leq r < \infty, \quad 0 \leq \tau < \infty, \quad 0 \leq s \leq s_w, \quad (3.5)$$

przy czym s_w oznacza długość wyrobiska.

Promień równoważny r_0 dla wyrobisk o przekroju niekołowym wyznacza się z zależności

$$r_0 = \frac{2A}{B}, \quad (3.6)$$

w której A (m²) oznacza pole przekroju poprzecznego wyrobiska, a B (m) jego obwód.

Warunek początkowy dla równania przewodnictwa cieplnego (3.4) podaje temperaturę skał jako funkcję położenia. Temperaturę tę nazywa się temperaturą pierwotną skał, przy czym jest to temperatura górotworu w obszarze nienaruszonym działalnością górnictwem. Za obszar taki uważa się górotwór oddalony o dziesiątki metrów od istniejących wyrobisk górniczych.

Pierwotna temperatura skał jest związana z przepływem ciepła z wnętrza Ziemi w kierunku jej powierzchni. Ciepło to jest wynikiem zachodzenia we wnętrzu Ziemi wielu przemian, takich jak: przemiany jądrowe, geochemiczne, procesów krystalizacji itp. [23].

Pole temperatury pierwotnej skał jest niejednorodne, przy czym temperatura pierwotna rośnie z głębokością i można ją uważać za niezależną od czasu [23, 61].

Średnią gęstość ziemskiego strumienia ciepła \dot{q}_z (W/m²) można wyznaczyć z zależności [23]

$$\dot{q}_z = -\lambda_s \frac{\partial \vartheta}{\partial H}, \quad (3.7)$$

gdzie:

λ_s – współczynnik przewodzenia cieplnego, W/(m · K),

ϑ – temperatura pierwotna skał, °C,

H – głębokość mierzona od powierzchni Ziemi.

Wyrażenie (3.7) jest spełnione lokalnie, a wartość \dot{q}_z jest stała wzdłuż całej osi H .

Do wyznaczenia strumienia ciepła \dot{q}_z konieczne jest wykonanie pomiaru temperatury pierwotnej skał na różnych głębokościach rozważanych warstw górotworu. Jeśli współczynnik przewodnictwa cieplnego w obrębie rozważanej warstwy górotworu jest stały, to przyrost temperatury pierwotnej skał jest liniową funkcją głębokości i wówczas można korzystać ze wzoru

$$\vartheta_0(H) = \vartheta_{os} + \sigma H, \quad (3.8)$$

w którym:

$\vartheta_0(H)$ – temperatura pierwotna górotworu na głębokości H (m) rozważanej warstwy skalnej, °C,

ϑ_{os} – temperatura pierwotna skał na głębokości, na której występuje strop tejże warstwy, °C,

σ – gradient geotermiczny dla rozważanej warstwy skalnej (°C/m).

Gradient geotermiczny określa przyrost temperatury pierwotnej skał przypadający na 1 m głębokości rozważanych skał. Odwrotność gradientu geotermicznego, tzn. zmianę głębokości odpowiadającą przyrostowi temperatury pierwotnej skał o 1°C, nazywa się stopniem geotermicznym Γ (m/°C).

Gdy masyw skalny jest jednorodny od powierzchni ziemi, wówczas $\vartheta_0(H)$ oblicza się z zależności

$$\vartheta_0(H) = T_{os} + \sigma H, \quad (3.9)$$

w której T_{os} – średnia temperatura wieloletnia nad powierzchnią Ziemi, °C.

W praktyce kopalnianej do wyznaczania temperatury pierwotnej skał bywa zazwyczaj stosowany wzór

$$\vartheta_0(H) = T_{os} + \frac{H - H_0}{\Gamma_m}, \quad (3.10)$$

gdzie:

H_0 – głębokość, do której sięgają sezonowe zmiany temperatury powietrza atmosferycznego, m,

Γ_m – średni stopień geotermiczny ($\Gamma_m = 1/\sigma_m$) na danym obszarze, m/°C,

W celu wyznaczenia średniego stopnia geotermicznego dla określonych kopalń lub całych regionów górniczych wykonuje się pomiary temperatury pierwotnej skał na różnych głębokościach zalegającego górotworu, przy czym korzysta się z różnych metod pomiarowych [23, 61].

Temperaturę pierwotną skał w okresie rozpoznawania złoża mierzy się w otworach poszukiwawczych wierconych z powierzchni Ziemi. W tym przypadku stosuje się na ogół termometry elektryczne z mostkiem elektrycznym opuszczonym w sondzie w czasie profilowania otworu lub układy z czujnikiem opuszczanym w otworze i aparaturę znajdującą

się na powierzchni Ziemi [61]. Jak wykazuje praktyka, dokładność pomiarów temperatury skał w otworach drążonych z powierzchni Ziemi nie jest wysoka.

Dokładniejsze wyniki pomiarów temperatury pierwotnej skał uzyskuje się na podstawie pomiarów wykonanych w dołowych wyrobiskach górniczych w świeżo odsłoniętej caliznie skalnej. Do pomiarów wybiera się przodki drążone w skałach płonnych lub złożu. Postęp przodków powinien być równomierny i niezbyt mały oraz przodki te nie powinny znajdować się w sąsiedztwie wcześniej prowadzonej eksploatacji, a także nie powinien występować wypływ wody z calizny skalnej. Należy przy tym brać pod uwagę tylko przodki w rejonach niezaburzonych tektonicznie.

Temperaturę skał mierzy się w otworach wiertniczych o typowych średnicach o długości 2–3 m, a niekiedy nawet 5 m. Czujniki temperatury umieszcza się w otworach, które zamyka się gliną lub uszczelnia pneumatycznie [23, 61]. Temperatura pierwotna skał może być mierzona termometrami rtęciowymi minimalnymi, jak również maksymalnymi. Często do pomiarów tej temperatury stosuje się różne urządzenia pomiarowe, przy czym są to zazwyczaj urządzenia prototypowe.

Współcześnie do pomiarów temperatury pierwotnej skał bywają używane kamery termowizyjne lub pirometry, nazywane także termometrami podczerwieni. Przyrządy te umożliwiają bezstykowy, zdalny pomiar temperatury, przy czym metoda pomiaru jest metodą nieinwazyjną, nie wprowadzającą zakłóceń w badanym obiekcie [23].

Temperaturę pierwotną skał w różnych obszarach górniczych wyznacza się niekiedy z zależności empirycznych uzyskanych na podstawie badań naukowych.

Warunek brzegowy dla równania przewodnictwa cieplnego skał (3.4) opisuje proces wymiany ciepła między skałami a przepływającym powietrzem zachodzącym na powierzchni ociosów wyrobiska. Zwykle przyjmuje się, że zależność między temperaturą powierzchni skał $\vartheta(r_0, s, \tau)$ a temperaturą powietrza kopalnianego $t(s, \tau)$ ujmuje równanie [31, 61]

$$\lambda_s \left. \frac{\partial \vartheta(r, s, \tau)}{\partial r} \right|_{r=r_0} = \alpha [\vartheta(r_0, s, \tau) - t(s, \tau)], \quad (3.11)$$

przy czym α oznacza współczynnik przejmowania ciepła.

W równaniu (3.11) lewa strona podaje strumień ciepła przewodzonego przez powierzchnię skał, a prawa – gęstość strumienia ciepła przejmowanego z tej powierzchni przez powietrze w tym samym czasie, która jest proporcjonalna do różnicy między temperaturą powierzchni skał i temperaturą powietrza.

Ze wzoru (3.11) można wyznaczyć strumień cieplny płynący od skał do powietrza kopalnianego

$$\dot{q}_s = B\alpha [\vartheta(r_0, s, \tau) - t(s, \tau)], \quad (3.12)$$

przy czym

$$B = 2\pi r_0, \quad (3.13)$$

gdzie r_0 jak we wzorze (3.6).

3.3. Ciepło generowane przez urządzenia elektromechaniczne

Pracujące w podziemnych wyrobiskach górniczych urządzenia mechaniczne i elektryczne przekazują do powietrza kopalnianego ciepło.

Wartość tego strumienia zależy przede wszystkim od mocy tych urządzeń, ich sprawności oraz sposobu przekształcania dostarczonej do urządzeń energii w inne jej postaci, a także od sposobu obciążenia urządzeń w czasie ich pracy.

Strumień energii cieplnej \dot{Q}_w (W) przekazywanej od napędu urządzenia do powietrza kopalnianego ujmuje zależność [61]

$$\dot{Q}_w = (N_d - N_u)k_n, \quad (3.14)$$

gdzie:

N_d – moc dostarczona do napędu urządzenia, W,

N_u – moc użyteczna napędu w watach (W), przy czym

$$N_u = \eta N_d \quad (3.15)$$

η – sprawność mechaniczna urządzenia,

k_n – współczynnik nierównomierności pracy urządzenia, tj. stosunek czasu pracy urządzenia w czasie doby do okresu całej doby.

Duża część energii przekazywanej przez napęd do urządzenia przez procesy tarcia przechodzi w ciepło.

Okazuje się [60, 61], że około 30% ciepła wydzielanego przez maszyny górnicze jest wynoszona poza wyrobiska z transportowanym urobkiem. Około 10–25% pozostałej części energii cieplnej przekazywana jest do powietrza kopalnianego na sposób jawny, 90–75% – na sposób niejawny. Można więc napisać następujące wzory:

- przyrost temperatury powietrza Δt_m (°C) wywołany pracą napędów i urządzeń mechanicznych

$$\Delta t_m = \frac{0,7(0,1 \div 0,25)\dot{Q}_w}{\dot{m}c_p} \quad (3.16)$$

- przyrost stopnia zawilżenia (wilgotności właściwej) powietrza ΔX_m (kg/kg) wywołany pracą tych urządzeń

$$\Delta X_m = \frac{0,7(0,9 \div 0,75)\dot{Q}_w}{\dot{m}r_w} \quad (3.17)$$

gdzie:

\dot{m} – strumień masy powietrza (kg/s) w wyrobisku, w którym pracuje urządzenie, przy czym

$$\dot{m} = \dot{V}\rho, \quad (3.18)$$

\dot{V} – strumień objętości powietrza w wyrobisku, m³/s,

ρ – gęstość masy powietrza w tym wyrobisku, kg/m³,

c_p – właściwa pojemność cieplna powietrza (zwykle przyjmuje się $c_p = 1005$ J/(kg · K),

r_w – utajone ciepło parowania wody (zwykle przyjmuje się $r_w = 2500$ kJ/kg).

W transformatorach na ciepło zamienia się 1,5–5% energii, w kablach i przewodach elektrycznych 4–10% [61].

Maszyny górnicze napędzane silnikami Diesla przekazują do otoczenia około 3 razy więcej ciepła niż maszyny napędzane silnikami elektrycznymi o takiej samej mocy użytecznej.

W przypadku stosowania urządzeń napędzanych silnikami na sprężone powietrze występuje ochładzanie powietrza kopalnianego, co wiąże się z ekspansją tego powietrza. Na skutek tarcia elementów urządzenia pneumatycznego następuje pewien przyrost temperatury powietrza kopalnianego.

W przypadku adiabatycznej ekspansji sprężonego powietrza między ciśnieniem i temperaturą tego powietrza zachodzi związek

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}, \quad (3.19)$$

gdzie:

T_1 – temperatura sprężonego powietrza, K,

T_2 – temperatura powietrza po ekspansji adiabatycznej, K,

p_1 – ciśnienie sprężonego powietrza, Pa,

p_2 – ciśnienie powietrza po ekspansji adiabatycznej, Pa,

κ – wykładnik adiabaty ($\kappa = 1,40$).

W kopalniach podziemnych pracuje obecnie coraz mniej urządzeń napędzanych silnikami na powietrze sprężone.

3.4. Ciepło generowane przez transportowany urobek

Urobek transportowany wyrobiskami górnictwami w przypadku korzystania z różnych środków technicznych jest przyczyną przekazywania ciepła od urobku do powietrza kopalnianego. Ilość tego ciepła zależy przede wszystkim od masy transportowanego urobku oraz od różnicy temperatury urobku i powietrza. Strumień energii cieplnej przepływającej do powietrza wynosi wówczas [61]

$$\Delta \dot{Q}_u = \dot{m}_u c_u \Delta \vartheta_u, \quad (3.20)$$

gdzie:

\dot{m}_u – strumień masy transportowanego urobku, kg/s,

c_u – właściwa pojemność cieplna transportowanego urobku, J/(kg · K),

$\Delta \vartheta_u$ – obniżenie temperatury transportowanego urobku w rozważanym wyrobisku, K.

Jak się okazuje [60, 61], jedynie około 70% ciepła obliczonego według wzoru (3.20) jest przekazywana do powietrza kopalnianego, przy czym około 15% ciepła przechodzi w sposób jawny, a 85% przez parowanie wilgoci. Przyrost temperatury powietrza Δt_u (°C) wywołany transportowanym urobkiem może być wyznaczony ze wzoru [61]

$$\Delta t_u = \frac{0,7 \cdot 0,15 \Delta \dot{Q}_u}{\dot{m} c_p}, \quad (3.21)$$

natomiast przyrost stopnia zawilżenia ΔX_u (kg/kg) tego powietrza jest dany wówczas zależnością

$$\Delta X_u = \frac{0,7 \cdot 0,85 \Delta \dot{Q}_u}{\dot{m} c_p}. \quad (3.22)$$

We wzorach (3.21) i (3.22) \dot{m} (kg/s) oznacza strumień masy powietrza płynącego w wyrobisku, w którym odbywa się transport urobku, a c_p (J/kg · K) – właściwą pojemność cieplną pod stałym ciśnieniem tego powietrza.

Według J. Voßa [60] obniżenie temperatury transportowanego urobku może być wyznaczone za pomocą następującego wzoru empirycznego

$$\Delta \vartheta_u = 0,0024 L^{0,8} (\vartheta_{u0} - t_{mw}), \quad (3.23)$$

gdzie:

L – długość wyrobiska, w którym transportowany jest urobek, m,

ϑ_{u0} – średnia temperatura urobku na początku wyrobiska, °C,

t_{mw} – średnia temperatura wilgotna, °C.

Nieco inny wzór na obniżenie temperatury transportowanego urobku został opracowany przez Główny Instytut Górnictwa [61].

3.5. Ciepło parowania wody

W wyrobiskach górniczych parowanie wody odbywa się kosztem entalpii skał, wody znajdującej się w wyrobisku, a także entalpii powietrza kopalnianego [61]. Ścisłe, ilościowe oszacowanie tych procesów jest trudne.

Przyrost zawilżenia powietrza (wilgotności powietrza) od X_1 do X_2 jest równoważny zmianie temperatury powietrza o Δt_p (K), przy czym

$$\Delta t_p = \frac{r_w}{c_p}(X_2 - X_1). \quad (3.24)$$

Po założeniu, że utajone ciepło parowania 1 g wody wynosi $r_w = 2500$ J, wzrost wilgotności właściwej powietrza o 1 kg/kg kosztem entalpii powoduje obniżenie jego temperatury

$$\Delta t_p = \frac{2500}{1,005} \cdot 10^{-3} = 2,49 \approx 2,5 \text{ K}.$$

W bezpośrednim kontakcie powietrza z wodą o stałej temperaturze powietrze może ulegać: ochłodzeniu, nagrzewaniu, nawilżaniu bądź też osuszaniu.

Jeśli temperatura wody jest wyższa od temperatury punktu rosy powietrza, to woda paruje i powietrze ulega nawilżeniu. Gdy natomiast temperatura wody jest niższa od temperatury punktu rosy powietrza, następuje wykraplanie pary wodnej z powietrza.

Równanie energii przepływającego powietrza w wyrobiskach górniczych

Temperaturę t (°C) powietrza kopalnianego przepływającego przez podziemne wyrobisko górnicze wyznacza się z równania energii, przy czym zakłada się, że przepływ powietrza w tym wyrobisku jest jednowymiarowy i ustalony. Wobec tego w opisie matematycznym przyjmuje się, że temperatura powietrza nie zmienia się w przekroju poprzecznym wyrobiska i zależy tylko od jednej współrzędnej s . Przyjmuje się także, że strumień masy powietrza w wyrobisku jest wielkością niezmienną w czasie i niezależną od miejsca w tym wyrobisku (współrzędnej s), spełnia się zatem równość

$$\dot{m} = \dot{V}\rho = \text{idem}, \quad (3.25)$$

przy czym \dot{V} i ρ jak we wzorze (3.18).

Takie założenie oznacza, że w rozpatrywanym wyrobisku pomija się zmiany strumienia objętości powietrza spowodowane przenikaniem powietrza przez zroby i nieszczelności w skałach oraz dopływem gazów wydzielających się z górotworu. Pomija się także zmiany ilości powietrza w wyrobisku spowodowane ruchem klatek i pojazdów, zamykaniem i otwieraniem tam wentylacyjnych w podziemiach kopalni, warunkami atmosferycznymi itp.

Wychodząc przy tych założeniach z równania uogólnionej entalpii właściwej h (J/kg) [22, 31, 61]

$$h = c_p t + \frac{w^2}{2} + gz \quad (3.26)$$

oraz uwzględniając dopływ ciepła do powietrza z górotworu i innych źródeł, można wyznaczyć zmianę jednostkowego strumienia uogólnionej entalpii, przypadającą na jednostkę długości ds wyrobiska, która jest równa strumieniowi ciepła dopływającego do jednostki strumienia masy powietrza na tym odcinku, a mianowicie

$$\frac{d}{ds} \left(c_p t + \frac{w^2}{2} + gz \right) = \frac{\dot{q}_s + \dot{q}_d}{\dot{m}} \quad (3.27)$$

gdzie:

c_p – właściwa pojemność cieplna powietrza kopalnianego, J/(kg · K),

t – temperatura tego powietrza, °C,

w – średnia prędkość przepływu powietrza w tymże wyrobisku, m/s,

g – miejscowe przyspieszenie siły ciężkości, m/s²,

z – wysokość niwelacyjna, m,

\dot{q}_s – jednostkowy strumień ciepła przekazywany od skał do powietrza przez powierzchnię calizny skalnej na odcinku wyrobiska o jednostkowej długości, W/m,

\dot{q}_d – jednostkowy strumień ciepła przenoszony od innych źródeł (z wyłączeniem skał) do powietrza na odcinku wyrobiska o jednostkowej długości, W/m.

Po pominięciu w zależności (3.27) zmian prędkości przepływu jako małe w porównaniu z innymi składnikami i odpowiednich przekształceniach uzyskujemy

$$\frac{dt}{ds} = \frac{\dot{q}_s}{\dot{m}c_p} + \frac{\dot{q}_d}{\dot{m}c_p} - \frac{g}{c_p} \frac{dz}{ds} \quad (3.28)$$

Zależność (3.28) nosi nazwę równania różniczkowego energii przepływającego powietrza [22, 60, 61].

4. Pomiar temperatury powietrza kopalnianego i lokalnych źródeł ciepła w kopalniach podziemnych

Temperatura jest podstawową zmienną termodynamiczną określającą stan substancji, przy czym im większa jest energia wewnętrzna ciała, tym szybszy jest ruch cząstek i tym wyższa jest jego temperatura [3, 22, 31, 44, 61].

Pomiar temperatury wiąże się z zerową zasadą termodynamiki, którą na początku XX wieku sformułował R.H. Fowler. Z zerowej zasady termodynamiki wynika, że wszystkie układy, które są w równowadze termicznej z układem odniesienia są wzajemnie w równowadze termicznej. Właściwość tę nazywa się temperaturą. Tak więc układy, które są w równowadze termicznej między sobą mają taką samą temperaturę, przy czym o równości temperatur, np. dwóch układów, można się przekonać za pomocą termometru (układu odniesienia trzeciego ciała). Jeżeli wskazania termometru, będącego w kontakcie z każdym ciałem z osobna, są takie same, to oba układy nie zmieniają swej temperatury po zetknięciu ze sobą.

W celu zmierzenia temperatury można wykorzystać dobrze znane z fizyki zjawiska, że podczas ogrzewania lub oziębiania ciał zmieniają się ich właściwości fizyczne, jak np. długość, objętość, gęstość, właściwości sprężyste, przewodnictwo elektryczne itp. Zmiana jednej z tych właściwości może być podstawą do zmierzenia temperatury, jeżeli jest znana zależność funkcyjna danej właściwości od temperatury.

Wyróżnia się teoretyczne i empiryczne skale temperatur. Skale teoretyczne oparte są na wyidealizowanych zależnościach teoretycznych [44]. Należą tu m.in. skala gazu doskonałego, termodynamiczna skala temperatur. Do skal empirycznych opartych na danych doświadczalnych należą np. międzynarodowa praktyczna skala temperatur. Punktami podstawowymi skal temperatur są zwykle temperatury równowagi międzyfazowej ciał jednoskładnikowych, np. temperatura punktu potrójnego wody (0,01 °C), temperatura wrzenia wody (100 °C) pod ciśnieniem 101 325 Pa.

W Polsce stosuje się skalę temperatury Celsjusza, opartą na dwóch punktach stałych, tj. 0 °C – temperatura topnienia lodu i 100 °C – temperatura wrzenia wody pod ciśnieniem 101 325 Pa.

W zależności od sposobu przejmowania ciepła między czujnikiem i ciałem, którego temperaturę określa się, przyrządy do pomiaru temperatury dzieli się na stykowe (termometry), bezstykowe (pirometry, kamery termowizyjne) i specjalne [3, 44, 61].

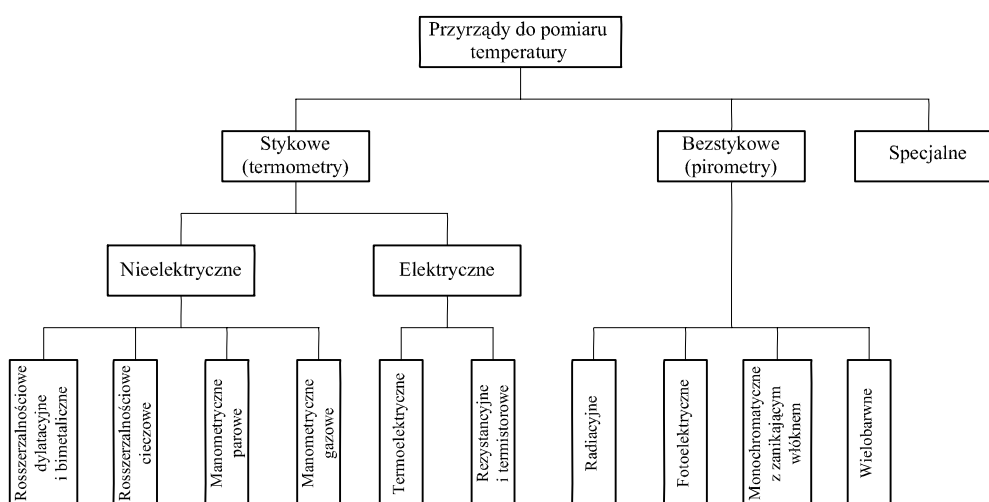
W górnictwie mierzy się najczęściej temperaturę powietrza kopalnianego i skał, powierzchni ociosów, a także lokalnych źródeł ciepła, jak np. elementów niektórych urządzeń mechanicznych i elektrycznych.

Do pomiaru temperatury powietrza kopalnianego stosuje się termometry rozszerzalnościowe. Termometr taki składa się ze szklanego zbiornika z pionową rurką zaopatrzoną w podziałkę. Zbiornik wypełniony jest cieczą termometryczną, przy czym zazwyczaj jest to: rtęć, alkohol etylowy, toluen, pentan.

Do pomiaru temperatury suchej i wilgotnej powietrza w podziemnych wyrobiskach górniczych stosowane są psychrometry, głównie Assmana.

Pomiar temperatury pierwotnej górotworu [23] oraz ociosów wyrobisk górniczych, a także powierzchni elementów urządzeń mechanicznych lub elektrycznych obecnie wykonuje się najczęściej metodą bezstykową pirometrami lub korzystając z kamer termowizyjnych.

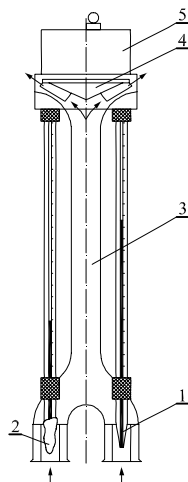
Klasyfikację przyrządów do pomiaru temperatur, według pracy [44], przedstawiono na rys. 4.1.



Rys. 4.1. Klasyfikacja przyrządów do pomiaru temperatury ze względu na fizyczną zasadę działania

Psychrometr Assmana zawiera dwa termometry: termometr suchy 1 i termometr wilgotny 2. Zbiorniczek rtęci termometru wilgotnego owinięty jest koszulką z gazy lub batystu, zwilżoną wodą destylowaną. W psychrometrze respiracyjnym (rys. 4.2) wentylator 4 wywołuje przepływ powietrza w otoczeniu zbiorniczków termometrów. W atmosferze o wilgotności względnej niższej od 100% woda odparowuje z wilgotnej otuliny i ochładza go do temperatury niższej niż temperatura termometru suchego. Najniższe obniżenie temperatury występuje, gdy szybkość odparowania potrzebna dla utrzymania stanu nasycenia nad otuliną przyjmuje wartość ustaloną [11]. Wówczas

wartość obniżenia temperatury zależy od czystości otuliny i wody, prędkości przepływu powietrza wentylacyjnego, zjawisk promieniowania ciepła, wymiarów i dokładności termometrów oraz właściwości przyjmowania masy i ciepła przez powietrze.



Rys. 4.2. Psychrometr Assmana: 1 – termometr suchy, 2 – termometr wilgotny, 3 – ekran, 4 – wentylator, 5 – obudowa silnika wentylatora

Zjawisko obniżania temperatury na termometrze mokrym zachodzić może również w temperaturach ujemnych wówczas, gdy termometr mokry nie pokrywa się lodem tylko pozostaje zwilżony tzw. wodą przechłodzoną.

Parametrem mającym istotny wpływ na dokładność odczytu z psychrometru jest prędkość przepływu powietrza, wokół mokrego termometru. Według norm amerykańskich [1] powinna być to prędkość w kierunku poprzecznym do osi strumienia od 3 do 5 m/s, a w kierunku wzdłuż osi nawiewu od 1,5 do 2,5 m/s, według [9] zaś prędkość ruchu powietrza powinna być większa niż 2,2 m/s.

W badaniach przedstawionych w niniejszej pracy korzystano z psychrometrów Assmana produkowanych przez Spółdzielnię Zootechnika w Krakowie o zakresie pomiarów od $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ i dokładności odczytu $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Pirometry należą do grupy bezstykowych przyrządów do pomiaru temperatury powierzchni ciał wykorzystujących ich promieniowanie cieplne [33].

Wyróżnia się trzy grupy pirometrów:

- pirometry radiacyjne (całkowitego promieniowania),
- pirometry pasmowe,
- pirometry wielowidmowe (wielobarwowy).

Pirometry podczerwieni umożliwiają pomiar temperatury w zakresie od -30 do $3000\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Najbardziej rozpowszechnione są pirometry pasmowe pracujące w paśmie $8\text{--}14\text{ }\mu\text{m}$.

Metoda pomiaru temperatury z wykorzystaniem pirometrów w wielu przypadkach jest niezastąpiona, a zwłaszcza do zalet tego rodzaju pomiarów należą [33]:

- pomiary zdalne, nieinwazyjne,
- szeroki zakres mierzonych temperatur,
- pomiar bezinercyjny,
- możliwość pomiaru temperatury obiektów będących w ruchu i niedostępnych,
- pomiar rozkładów powierzchniowych temperatury,
- mobilność aparatury pomiarowej,
- łatwość gromadzenia informacji,
- łatwość zastosowania w układach automatyki przemysłowej.

Do najważniejszych wad pirometrycznego pomiaru temperatury należą:

- konieczność optycznego dostępu do badanej powierzchni,
- konieczna znajomość współczynnika emisyjności,
- ograniczenie możliwości pomiaru temperatury do powierzchni obiektu,
- wpływ przepuszczalności atmosfery na wyniki pomiaru temperatury obiektu.

Zasada działania pirometru dwubarwowego polega na pomiarze stosunku wartości natężenia promieniowania wysyłanego przez badane ciało przy dwóch długościach fali. Dzięki czemu w wielu przypadkach nie jest konieczna znajomość współczynnika emisyjności badanego obiektu. Jest to bardzo istotne w takim przypadku pomiaru temperatury, gdy współczynnik emisyjności ulega zmianie.

Każdy pirometr zbudowany jest z następujących elementów:

- układu optycznego skupiającego promieniowanie na detektorze,
- detektora promieniowania (termicznego lub fotonowego),
- układu przetwarzania sygnału,
- wskaźnika wielkości mierzonej.



Rys. 4.3. Pirometr Thermopoint TPT 64plus

Wyniki badań prezentowane w niniejszej monografii są oparte m.in. na pomiarach temperatury dokonanych pirometrami Thermopoint TPT 64plus w ramach projektu badawczego 4T12A03527 Ministerstwa Edukacji i Nauki.

Pirometr ten (rys. 4.3) ma celownik laserowy, funkcję zmiany emisyjności, alarm przekroczenia zadanego poziomu temperatury, możliwość rejestracji temperatury maksymalnej lub minimalnej w danej serii pomiarowej oraz odczyt różnicy temperatur i temperatury średniej, pamięć wewnętrzną (100 punktów pomiarowych), siedmiosekundowe podtrzymywanie wyniku pomiaru po zwolnieniu spustu, blokadę spustu, wyświetlacz graficzny, możliwość współpracy z drukarką lub komputerem.

Pirometr ten ma następującą charakterystykę techniczną:

- pomiar temperatury od $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $900\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- rozdzielczość wyświetlania $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- dokładność odczytu $\pm 1\%$ odczytu lub $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, które jest większe, $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ dla obiektów poniżej $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- powtarzalność $\pm 0,5\%$ odczytu lub $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, którekolwiek jest większe,
- czas pomiaru 250 ms ,
- zakres spektralny $8\text{--}14\text{ }\mu\text{m}$,
- stosunek odległości do średnicy pola pomiarowego $60:1$,
- temperatura pracy otoczenia $0\text{--}50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (laser max $45\text{ }^{\circ}\text{C}$),
- temperatura przechowania $-20\text{--}50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (bez baterii),
- zasilanie $2 \cdot 1,5\text{ V}$ baterie alkaliczne typu AA,
- wymiary $200 \times 170 \times 50\text{ mm}$,
- mocowanie do statywu $1/4'' - 20\text{ UNC}$.

Pirometr Thermopoint TPT 64plus jest zgodny ze standardami Unii Europejskiej.

Kamera termowizyjna składa się z następujących elementów: detektora podczerwieni (matryca detektorów) z układem chłodzenia, obiektywu dla zakresu podczerwieni, zespołu elektronicznego toru wzmocnienia i odczytu sygnału z detektora, elektronicznego zespołu rejestracji i analizy sygnału oraz zespołu wizualizacji (monitora) [27, 38, 40].

Detektor jest najważniejszym i najbardziej technologicznie zaawansowanym elementem kamery. Jest on przetwornikiem energii promieniowania podczerwonego na inne wielkości fizyczne, np. prąd, napięcie, zmianę rezystancji itp.

Detektory w kamerach termowizyjnych mogą być pojedyncze, liniowe lub budowane w postaci matryc składających się np. z 320×240 pojedynczych detektorów (pikseli). Detektory dzieli się [27, 40] na termiczne i fotonowe, a także na chłodzone i niechłodzone (pracujące w temperaturze otoczenia).

Detektory fotonowe wykorzystują oddziaływanie fotonów na zmianę koncentracji nośników ładunku w materiale półprzewodnikowym, wskutek czego w zależności od

rodzaju detektora zmienia się jego rezystancja lub natężenie prądu przepływającego przez detektor.

Zasada działania detektorów termicznych polega na tym, że promieniowanie padające na powierzchnię detektora jest przez tę powierzchnię absorbowane, wywołuje zmianę temperatury detektora, która z kolei powoduje zmiany jego właściwości elektrycznych lub optycznych.

W kamerach termowizyjnych coraz częściej stosuje się detektory termiczne, zwłaszcza mikrobolometry.

Podstawową zaletą detektorów mikrobolometrycznych jest możliwość pracy w temperaturze otoczenia, a także możliwość pracy w szerokim przedziale widmowym.

Do najnowszych detektorów należą tzw. matrycowe detektory ze „studniami kwantowymi” zwane detektorami QWIP [27, 40]. Materiałem półprzewodnikowym do ich produkcji jest głównie arsenek galu (GaAs). Wymagają one chłodzenia kriogenicznego.

W niektórych (tanich) kamerach termowizyjnych stosuje się matryce detektorów piroelektrycznych, które nie wymagają chłodzenia. Kamery tego typu wymagają umieszczenia przed detektorem przesłony (tzw. czopera), gdyż detektor piroelektryczny wykrywa wyłącznie zmiany temperatury.

Do najważniejszych parametrów detektorów promieniowania podczerwonego określających ich przydatność w termowizji należą: czułość widmowa określająca widmowy zakres pracy, wykrywalność (detekcyjność), stała czasowa, temperatura pracy, wymiary oraz kąt pola widzenia detektora [14, 27, 38, 40, 48].

Podstawowym zadaniem obiektywu i towarzyszących mu elementów optycznych jest zebranie promieniowania wysyłanego przez obiekt i skupienie go na powierzchni detektora. Obiektyw ma za zadanie poprawienie stosunku sygnału do szumu, co jest realizowane przez dobranie odpowiedniej przepuszczalności widmowej obiektywu. Oznacza to, że elementy optyczne obiektywu muszą charakteryzować się dużą przepuszczalnością (transmisją) w zakresie widmowym pracy kamery i małą przepuszczalnością poza tym zakresem. W związku z tym elementy optyczne kamery pokrywa się specjalnymi warstwami antyrefleksyjnymi (przeciwodblaskowymi), które zwiększają transmisję obiektywu i zawężają widmowy zakres pracy obiektywu.

Obiektywy kamer termowizyjnych wykonuje się obecnie z takich materiałów optycznych, jak: german (Ge), krzem (Si), selenek cynku (ZnSe), gasir ($\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$) oraz amtir ($\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$) [27, 40].

Niektóre kamery termowizyjne mogą pracować z obiektywami zwierciadlanymi. Zaletą tych obiektywów jest szeroki zakres pracy oraz dobra przepuszczalność, jednak wykonywane są one przede wszystkim dla niewielkich kątów pola widzenia.

Urządzenia termowizyjne najnowszej generacji mają wieloelementowe detektory podczerwieni (zintegrowane, hybrydowe lub monolityczne matryce detektorów), co przyczyniło się do wyeliminowania skomplikowanego mechaniczno-optycznego zespołu poszukiwania obrazu.

Zastosowanie szybkich matryc umożliwiło rejestrację ultraszybkich procesów cieplnych, co leży u podstaw tzw. ultraszybkiej termografii. Oferowane są obecnie systemy termowizyjne pozwalające na uzyskanie nawet kilkuset termogramów na sekundę.

Należy nadmienić, że kamery z pojedynczym detektorem uważane są za najodpowiedniejsze do celów metrologicznych, ponieważ kamery z jednym detektorem (również z linijką) stosunkowo łatwo można precyzyjnie wyskalować (skalibrować). Okazuje się także, że dla takiej kamery łatwiej jest zaprojektować i wykonać obiektyw, który nie wnosi zniekształceń optycznych i energetycznych.

W najnowszych kamerach proces kalibracji detektorów odbywa się automatycznie, po każdym załączeniu kamery.

Otrzymany na ekranie monitora kamery termowizyjnej, zarówno z pojedynczym detektorem, jak i z matrycą, obraz termiczny jest w przybliżeniu odwzorowaniem rozkładu temperatury na obserwowanym obiekcie.

Kamery termowizyjne dzieli się m.in. na krótkofalowe pracujące w paśmie krótkofalowym 3–5 μm oraz długofalowe w paśmie długofalowym 8–14 μm [27, 40].

Do najważniejszych parametrów technicznych kamer termowizyjnych zalicza się: rozdzielczość temperaturową oraz rozdzielczość geometryczną (przestrzenną), które są zależne od zastosowanego detektora podczerwieni.

W badaniach związanych z niniejszą monografią korzystano z kamery termowizyjnej produkcji szwedzkiej FLIR typu ThermaCAM™ PM 575 (rys. 4.4). Kamera ta ma certyfikat zgodności ze standardem ISO 9001.



Rys. 4.4. Kamera termowizyjna ThermaCAM™ PM 575

5. Stan zagrożenia klimatycznego kopalń węgla kamiennego i rud miedzi

Na wartość temperatury powietrza kopalnianego w miejscu pracy, jak to już wspomniano, wpływają: temperatura pierwotna skał, temperatura powietrza na podziemiu szybu wdechowego, wielkość wydobywania, intensywność przewietrzania, pracujące w wyrobiskach górniczych maszyny i urządzenia górnicze.

Według przepisów górniczych [47] temperatura powietrza mierzona termometrem suchym w miejscach pracy nie powinna przekraczać 28 °C, a intensywność chłodzenia powietrza mierzona katatermometrem wilgotnym nie powinna być mniejsza od 11 katastopni wilgotnych. Gdy temperatura powietrza jest wyższa od 28 °C, ale niższa od 33 °C lub jeśli intensywność chłodzenia jest mniejsza od 11 katastopni wilgotnych, wówczas obowiązuje skrócenie dniówkowego czasu pracy do 6 godzin. W przypadku gdy temperatura powietrza przekracza 33 °C na termometrze suchym, wówczas normalna praca jest zabroniona. W tym przypadku mogą być prowadzone wyłącznie prace ratownicze.

5.1. Warunki termiczne w kopalniach Górnośląskiego Zagłębia Węglowego

Temperatura pierwotna skał w kopalniach Górnośląskiego Zagłębia Węglowego jest bardzo zróżnicowana. Średni stopień geotermiczny na tym obszarze wynosi 32,5 m/°C i waha się od 26 m/°C w rejonie Rudy Śląskiej do około 42 m/°C w kopalniach nadwiślańskich.

Najwyższe temperatury pierwotne skał występują we wschodniej części Spółki Jastrzębskiej. Na poziomie –450 m na obszarze kopalni Borynia temperatura ta wynosi 38 °C, a na poziomie –750 m w kopalni Pniówek 51,8 °C. Najniższe temperatury pierwotne skał występują w kopalniach nadwiślańskich. Na przykład w kopalni Silesia na poziomie –450 m temperatura ta wynosi 22,4 °C, a na poziomie –750 m w kopalni Piast 29 °C.

Według badań GIG [61] temperatury pierwotne skał dla różnych głębokości zawarte są w przedziałach:

- od 16 °C do 32 °C – głębokość 250 m,
- od 20 °C do 42 °C – głębokość 500 m,
- od 24 °C do 52 °C – głębokość 750 m,
- od 28 °C do 63 °C – głębokość 1000 m.

Wyraźna anomalia w zakresie niższych temperatur pierwotnych skał występuje w górotworze zalegającym między Chrzanowem i Tychami, anomalie natomiast wyższych temperatur pierwotnych skał w rejonie między Chorzowem i Zabrzem oraz Suszczem i Świerklanami a Czechowicami.

W kopalniach węgla kamiennego zagrożenie klimatyczne dla całej kopalni określa się na podstawie temperatury pierwotnej skał t_{pg} (°C) na najgłębszym poziomie eksploatacyjnym [13, 39, 42]. W zależności od wartości tej temperatury kopalnie węgla kamiennego dzieli się na cztery grupy, a mianowicie:

- grupa I – kopalnie o bardzo dużym zagrożeniu klimatycznym, gdy $t_{pg} > 40$ °C (np. kopalnie: Bielszowice, Halemba, Wujek-Śląsk),
- grupa II – kopalnie o dużym zagrożeniu klimatycznym, gdy 35 °C $< t_{pg} \leq 40$ °C (np. kopalnie: Borynia, Budryk, Jas-Mos, Knurów, Sośnica, Zofiówka),
- grupa III – kopalnie o małym zagrożeniu klimatycznym, gdy 30 °C $< t_{pg} \leq 35$ °C (np. kopalnie: Bogdanka, Makoszowy, Staszic) [39],
- grupa IV – kopalnie niezagrożone klimatycznie ($t_{pg} < 30$ °C).

W kopalniach węgla kamiennego w 2004 r. zarejestrowano 146 wyrobisk o podwyższonej temperaturze powietrza kopalnianego (powyżej 28 °C).

W czterech kopalniach o bardzo dużym zagrożeniu klimatycznym ($t_{pg} > 40$ °C) w 2004 r. stwierdzono 40 wyrobisk z podwyższoną temperaturą [42]. W dziesięciu kopalniach o dużym zagrożeniu klimatycznym (35 °C $< t_{pg} \leq 40$ °C) stwierdzono 71 takich wyrobisk, a w sześciu kopalniach o małym zagrożeniu było ich 24. W trzech kopalniach niezagrożonych klimatycznie wyrobisk o podwyższonej temperaturze było 11. Najwięcej wyrobisk górniczych, w których występowały podwyższone temperatury, to KWK Pniówek (24 wyrobiska), KWK Borynia (19 wyrobisk) i KWK Zofiówka (11 wyrobisk).

5.2. Warunki termiczne w kopalniach rud miedzi w LGOM-ie

W kopalniach rud miedzi w LGOM-ie temperatura powietrza jest determinowana głównie przez [36, 41, 61]: dużą głębokość eksploatacji, wysoką temperaturę pierwotną skał, dużą liczbę wyrobisk wielonitkowych oraz duże powierzchnie kontaktu skał z przepływającym powietrzem, a także liczne maszyny górnicze napędzane silnikami spalinowymi.

Temperatura pierwotna skał złożowych na obszarze LGOM-u charakteryzuje się dużą zmiennością.

Średnie temperatury pierwotne górotworu dla poszczególnych głębokości złoża wynoszą: 30 °C – około 700 m n.p.m., 40 °C – około 900 m n.p.m. i 45 °C – około 1100 m n.p.m.

Średni stopień geotermiczny w części południowo-wschodniej złoża wynosi 27,4 m/°C, a w części północno-zachodniej 30,2 m/°C.

Ilość radiogenicznego ciepła wydzielanego ze wszystkich skał w obszarze złożowym LGOM-u wynosi 8,4 do 29,3 J/rok/Mg skały, średnio 21 J/rok/Mg skały. Wartość tego ciepła w przypadku warstw o podwyższonych koncentracjach pierwiastków promieniotwórczych wynosi od 138 do 154 J/rok/Mg skały.

Struktura oddziaływanych sieci wentylacyjnych w kopalniach rud miedzi podyktowana istnieniem dużej liczby wyrobisk wielonitkowych w polach eksploatacyjnych, utrudnia przewietrzanie frontów eksploatacyjnych, a duża powierzchnia kontaktu skał o wysokiej temperaturze pierwotnej nie sprzyja utrzymaniu pożądanych warunków klimatycznych. Na niekorzystne warunki klimatyczne w oddziałach eksploatacyjnych ponadto wpływa w dużym stopniu ciepło pochodzące od maszyn górniczych o napędzie spalinowym. W LGOM-ie pracuje obecnie około 1300 takich maszyn. W związku z tym, w wyrobiskach górniczych kopalń LGOM-u występują temperatury powietrza mierzone termometrem suchym wynoszące 33 °C, a nawet przekraczające tę wartość.

Złoża rudy miedzi monokliny przedsudeckiej zalicza się do złóż [36]:

- ciepłych, gdy temperatura skał wynosi od 20 °C do 30 °C,
- gorących, gdy temperatura skał wynosi od 30 °C do 40 °C,
- bardzo gorących, gdy temperatura pierwotna górotworu wynosi powyżej 40 °C.

W kopalniach rud miedzi w LGOM-ie w bardzo wielu wyrobiskach występują podwyższone temperatury powietrza kopalnianego, tj. temperatury przekraczające 28 °C. Świadczą o tym liczby oddziałów pracujących w skróconym czasie pracy. W kopalni „Lubin” w 2003 r. były trzy oddziały produkcyjne, jeden oddział obejmujący roboty przygotowawcze (chodnikowe) i dziewięć oddziałów pomocniczych, w których w całości obowiązywał skrócony do 6 godzin dniówkowych czas pracy. W kopalni „Polkowice-Sierszowice” było takich oddziałów odpowiednio 5, 1 i 9, a w kopalni „Rudna” – 12, 4 i 17. W oddziałach tych temperatura powietrza kopalnianego na ogół we wszystkich wyrobiskach przekraczała 28 °C, a niekiedy nawet 33 °C [41].

Przyczyną podwyższonej temperatury powietrza w wyrobiskach górniczych zarówno w kopalniach węgla kamiennego, jak i rud miedzi, jak już wspomniano, są dodatkowe źródła ciepła, a zwłaszcza: wysoka koncentracja wydobywania, która pociąga za sobą duże moce pracujących urządzeń energomechanicznych oraz wydzielanie się ciepła z masy transportowanego urobku, transformatorów i kabli elektrycznych, pomp, rurociągów wodnych i powietrznych, dodatkowych źródeł wilgoci, jak np. wpływ wody ze skał itp.

W kopalniach rud miedzi szczególnie duży wpływ na warunki klimatyczne wywierają maszyny górnicze napędzane silnikami spalinowymi. Maszyny te, oprócz znacznego podwyższenia temperatury powietrza kopalnianego, są źródłem gazów toksycznych w znacznym stopniu pogarszających warunki pracy w tych kopalniach.

5.3. Warunki termiczne w kopalni Bogdanka

Obszar górniczy kopalni Bogdanka (Lubelski Węgiel Bogdanka SA) wynosi 57 km². W budowie geologicznej tego obszaru biorą udział utwory czwartorzędu, trzeciorzędu, kredy, jury i karbonu. Serię produktywną stanowią utwory westfalu – warstwy lubelskie. Złoże znajduje się pod nadkładem 650–730 m. Występuje 18 udokumentowanych pokładów bilansowych o miąższości od 0,70 do 3,70 m. Do przemysłowych zaliczono 8 pokładów o miąższości od 1,2 do 3,70 m. Aktualnie eksploatacja węgla prowadzona jest w pokładach 382 i 385/2, przy czym głębokość eksploatacji wynosi 960 m. Pokłady węgla zalegają prawie poziomo, a ich upad średnio wynosi 2°.

W kopalni Bogdanka podwyższona temperatura powietrza kopalnianego wiąże się głównie z dużą głębokością eksploatacji, stosunkowo wysokimi temperaturami pierwotnymi skał na poszczególnych poziomach wydobywczych, znacznymi długościami dróg powietrznych, dużą koncentracją wydobywania oraz dużymi mocami pracujących maszyn górniczych.

Temperatura pierwotna skał waha się w dość szerokich granicach i przykładowo wynosiła: w chodniku nadścianowym 9/I/382 na poziomie 920 m – 27,8 °C, w chodniku podścianowym 8/II/382 na poziomie 864 m – 28,4 °C, w przecince 3/IV/385 na poziomie 920 m – 28,3 °C i w chodniku dojazdowym 2 na poziomie 960 m – 30,7 °C.

Średni stopień geotermiczny dla kopalni Bogdanka wynosi $\Gamma = 44,0$ m/°C. Jest on dla obszaru górniczego kopalni Bogdanka większy o 11 m/°C od średniego stopnia geotermicznego wyznaczonego dla kopalń Zagłębia Górnośląskiego, co jest korzystne ze względu na zagrożenie termiczne w tej kopalni. Niemniej jednak w kopalni Bogdanka występuje przekroczenie dopuszczalnej przepisami bhp temperatury powietrza kopalnianego wynoszącej 28 °C (zmierzonej termometrem suchym). Według pracy [42] w 2004 r. w kopalni Bogdanka podwyższoną temperaturę powietrza (powyżej 28 °C) stwierdzono w 7 wyrobiskach. Można to wiązać m.in. z dużym wydobywaniem wynoszącym z jednej ściany około 10 000 t/d i dużymi mocami urządzeń energomechanicznych (2 MW w ścianie i 1 MW w chodniku podścianowym).

Znaczący wpływ na przyrost temperatury powietrza kopalnianego, oprócz dużych mocy pracujących urządzeń energomechanicznych, wywiera węgiel transportowany wyrobiskami górniczymi, który przekazuje ciepło pierwotne skał do powietrza. Na skutek kontaktu świeżo odsłoniętych powierzchni skalnych z tlenem następuje utlenianie węgla i przekazywanie ciepła utleniania do powietrza kopalnianego. Oba te procesy w kopalni Bogdanka wywierają znaczący wpływ na temperaturę powietrza.

Aby utrzymać temperaturę powietrza kopalnianego w granicach wymaganych przepisami górnictwymi, w podziemiach kopalni Bogdanka stosuje się 7 chłodziarek powietrza kopalnianego typu DV-290 o łącznej mocy chłodniczej 2 MW.

Planowany jest dalszy wzrost zapotrzebowania mocy chłodniczej do około 5,4 MW, gdyż obliczenia prognostyczne wskazują na to, że w ścianach eksploatacyjnych na całej ich długości może nastąpić przekroczenie temperatury powietrza wynoszącej 28 °C, a w niektórych przypadkach na wylocie ze ścian temperatura powietrza może przekroczyć nawet 33 °C. Jak wykazuje prognoza, przyrost temperatury powietrza w chodnikach podścianowych będzie wynosił od 2,5 °C do 5,4 °C.

Również w przodkach robót przygotowawczych wystąpią przekroczenia dopuszczalnej temperatury powietrza. Dlatego też w celu zapewnienia temperatury powietrza zgodnie z przepisami górnictwymi w przodkach wyrobisk przewietrzanych odrębnie konieczne będzie instalowanie urządzeń chłodniczych o mocy co najmniej 300 kW w każdym wyrobisku.

6. Ocena zagrożenia klimatycznego

Ocenę stanu zagrożenia klimatycznego w wyrobiskach istniejących dokonuje się na podstawie bezpośrednich pomiarów parametrów powietrza kopalnianego, takich jak: temperatura sucha i wilgotne powietrze, prędkość jego przepływu oraz intensywności chłodzenia określonej katatermometrem wilgotnym [2, 3, 31, 44, 61].

Miarą zagrożenia klimatycznego dla poziomu wydobywczego jest wskaźnik klimatyczny ujęty wzorem [13, 39, 42, 57, 61]

$$K = \frac{t_{pg} - t_d}{t_d - t_p}, \quad (6.1)$$

gdzie:

t_{pg} – temperatura pierwotna skał na rozważanym poziomie wydobywczym, °C,

t_d – dopuszczalna temperatura w miejscu pracy $t_d = 28$ °C (bez stosowania skróconego czasu pracy),

t_p – temperatura powietrza na podszybiu poziomym, z którego doprowadza się powietrze świeże do wyrobisk przygotowawczych i eksploatacyjnych, °C.

Stopień zagrożenia klimatycznego określa się następująco:

- gdy $K < 0$, wówczas nie ma zagrożenia klimatycznego,
- jeśli $0 \leq K < 0,8$, to istnieje niewielkie zagrożenie klimatyczne, któremu można zapobiec, stosując racjonalne sposoby przewietrzania wyrobisk górniczych,
- w przypadku $0,8 \leq K < 1,5$ istnieje duże zagrożenie klimatyczne, które należy zwalczać środkami wentylacyjnymi, przede wszystkim stosując takie metody przewietrzania, aby powietrze świeże ulegało możliwie najmniejszemu nagrzewaniu; gdy jest to mało skuteczne, trzeba stosować również urządzenia chłodnicze,
- gdy $K \geq 1,5$, istnieje bardzo duże zagrożenie klimatyczne, dla zmniejszenia którego konieczne jest stosowanie urządzeń chłodniczych.

Wskaźnik klimatyczny K służy w zasadzie do wstępnej oceny zagrożenia klimatycznego. Dokładniejszą ocenę zagrożenia klimatycznego w projektowanych wyrobiskach górniczych uzyskuje się dokonując prognozy warunków klimatycznych. W praktyce kopalnianej prognoza ta jest wykonywana różnymi metodami [2, 25, 31, 51, 52, 61].

Określenie stanu warunków termicznych przeprowadza się także na podstawie określonych wskaźników cieplnych warunków pracy obejmujących fizyczne właściwości oraz fizjologie różnych mechanizmów procesów wymiany ciepła i wilgoci między organizmem człowieka a otoczeniem.

Wskaźnik *WBGT*, według pracy [4] może być wyznaczony z zależności

$$WBGT = 0,67t_w + 0,33t, \quad (6.2)$$

gdzie:

t_w – temperatura termometru wilgotnego zmierzona psychroaspiratorem Assmana, °C,

t – temperatura termometru suchego wymienionego psychroaspiratora, °C.

Dla pracy ciężkiej, za którą uważa się pracę górniczą, wskaźnik *WBGT* nie powinien przekraczać następujących wartości:

- 25 °C dla pracowników zaaklimatyzowanych w czasie niewyczuwalnego ruchu powietrza,
- 26 °C dla pracowników zaaklimatyzowanych w czasie wyczuwalnego przepływu powietrza,
- 22 °C dla pracowników niezaaklimatyzowanych w czasie niewyczuwalnego ruchu powietrza,
- 23 °C dla pracowników niezaaklimatyzowanych w czasie wyczuwalnego przepływu powietrza.

Wprowadzany do górnictwa jest także wskaźnik nazwany temperaturą zastępczą klimatu t_{zk} , którą definiuje wzór [59]

$$t_{zk} = 0,6t_w + 0,4t - w, \quad (6.3)$$

przy czym:

t_w – temperatura termometru wilgotnego, °C,

t – temperatura termometru suchego, °C,

w – średnia prędkość przepływu powietrza w m/s w wyrobisku górniczym, pomnożona przez współczynnik przeliczeniowy 1 s °C/m.

Graniczne wartości temperatury zastępczej klimatu zależne są od kategorii ciężkości pracy, podobnie jak wartości graniczne wskaźnika obciążenia termicznego *WBGT* i wynoszą dla [4, 59, 61]:

- pracy lekkiej $t_{zkgr} = 30$ °C,
- pracy umiarkowanej $t_{zkgr} = 28$ °C,
- pracy ciężkiej $t_{zkgr} = 26$ °C,
- pracy bardzo ciężkiej $t_{zkgr} = 25$ °C.

Jeśli temperatura zastępcza t_{zk} przewyższa wartości graniczne, to praca powinna być skrócona do sześciu godzin. Gdy natomiast $t_{zk} \geq 32$ °C, wówczas praca powinna być w ogóle zabroniona, z wyjątkiem akcji ratowniczej.

Do oceny zagrożenia klimatycznego bywa także stosowany tzw. wskaźnik dyskomfortu cieplnego zdefiniowany następująco [7]

$$\delta = \frac{T_A - T_B}{T_C - T_B}, \quad (6.4)$$

gdzie:

T_A – efektywna temperatura amerykańska występująca w środowisku o znanych parametrach fizycznych [2, 7, 61], °C,

T_B – efektywna temperatura amerykańska określona dla parametrów fizycznych środowiska, w którym panują warunki komfortu cieplnego [7, 61], °C,

T_C – efektywna temperatura amerykańska graniczna, której wartość zależy od wydatku energetycznego, stopnia aklimatyzacji pracownika oraz oporu cieplnego odzieży [7, 61], °C.

Wskaźnik dyskomfortu cieplnego określa liczbowo jak dalece warunki klimatyczne panujące w danym środowisku pracy różnią się od warunków klimatycznych komfortu cieplnego oraz od granicznych warunków klimatycznych pod względem bezpieczeństwa cieplnego, przy czym gdy [7]:

- $\delta < 0$ – środowisko odczuwalne jest jako chłodne,
- $\delta = 0$ – komfort cieplny,
- $0 \leq \delta < 0,2$ – korzystne warunki klimatyczne,
- $0,2 \leq \delta < 0,5$ – zadowalające warunki klimatyczne,
- $0,5 \leq \delta < 0,8$ – trudne warunki klimatyczne,
- $0,8 \leq \delta < 1$ – bardzo trudne warunki klimatyczne,
- $\delta \geq 1$ – środowisko odczuwalne jest jako zbyt ciepłe i dyskomfort jest niebezpieczny dla zdrowia.

Według [7] w przypadku gdy wskaźnik dyskomfortu cieplnego $\delta \geq 1$, praca w wyrobisku górniczym powinna być zabroniona, natomiast gdy $0,8 \leq \delta < 1$, czas pracy powinien być skrócony do 6 godzin.

7. Zwalczanie zagrożenia klimatycznego

Praca w trudnych warunkach klimatycznych, a zwłaszcza w środowisku gorącym wiąże się często z ostrymi dolegliwościami, których przyczyną są zaburzenia równowagi wodnomineralnej z upośledzeniem termoregulacji organizmu [45, 50, 58]. Skutkami przebywania w gorących miejscach pracy mogą być [50, 58]:

- udar cieplny spowodowany porażeniem ośrodka termoregulacji, który jest groźny dla życia, gdyż temperatura wewnętrzna ciała wzrasta do 41 °C lub nawet powyżej tej temperatury,
- wyczerpanie cieplne spowodowane utratą wody i soli w wyniku pocenia się, czemu towarzyszy ogólne osłabienie, zawroty głowy, nudności, bóle głowy, chwiejność układu krążenia, omdlenie cieplne,
- dolegliwości ze strony mięśni, jak np. bolesne skurcze spowodowane zaburzeniami równowagi wodnoelektrolitycznej,
- odwodnienie organizmu spowodowane brakiem wody utraconej w czasie pocenia się,
- zmiany skórne, jak np. potówka, stany zapalne spowodowane infekcją skóry itp.

Jak się okazuje, pracownicy zatrudnieni w środowisku gorącym piją zwykle mniej płynów niż ilość wody utracona z potem, co powoduje odwodnienie organizmu, które obniża zdolność do pracy, przyspiesza częstość skurczów serca i upośledza termoregulację. Ogólnie można stwierdzić, że z pogorszeniem warunków klimatycznych wydajność pracy górniczej maleje, a także wzrasta liczba wypadków wśród pracowników [50, 58]. Odwodnieniu organizmu można zapobiec przez podawanie pracownikom odpowiednich napojów z dodatkami soli.

W wyrobiskach górniczych o dużym zagrożeniu klimatycznym podejmowane są liczne działania w celu ograniczenia tego zagrożenia, przy czym w pierwszej kolejności są zwykle stosowane różne środki wentylacyjne, a zwłaszcza należy [13, 39]:

- ujmować wodę w miejscach jej wypływu w szybach i innych wyrobiskach i odprowadzać ją odpowiednio rurociągami lub krytymi ściekami,
- nie doprowadzać powietrza świeżego do wyrobisk eksploatacyjnych chodnikami wodnymi,

- stosować możliwie duże prędkości przepływu powietrza w wyrobiskach górniczych, zwłaszcza w wyrobiskach doprowadzających powietrze do miejsca pracy załogi,
- eliminować z dróg powietrza świeżego i miejsc pracy dodatkowe źródła ciepła, jak np. rurociągi wodne i powietrza sprężonego, urządzenia energetyczne, odstawcze itp.
- likwidować wyrobiska zbędne w celu uproszczenia sieci wentylacyjnej,
- eliminować z sieci wentylacyjnej wewnętrzne ucieczki powietrza, np. przez zroby, spięcia wentylacyjne itp.,
- unikać szeregowego przewietrzania wyrobisk eksploatacyjnych,
- stosować w miarę możliwości wentylację homotropową,
- stosować odpowiednio intensywne przewietrzanie lutniowe drażonych wyrobisk udostępniających i przygotowawczych.

W wyrobiskach o bardzo dużym zagrożeniu klimatycznym, zwłaszcza w wyrobiskach, w których temperatura powietrza kopalnianego zmierzona termometrem suchym jest wyższa od 33 °C lub określone wskaźniki klimatu przekraczają wartości graniczne, dla zmniejszenia zagrożenia należy stosować sztuczne ochładzanie powietrza. W okresie ostatnich 20 lat w wielu kopalniach Górnośląskiego Zagłębia Węglowego oraz w kopalniach rud miedzi w Legnicko-Głogowskim Okręgu Miedziowym nastąpiło znaczne pogorszenie warunków klimatycznych, spowodowane przede wszystkim wzrostem głębokości eksploatacji, zwiększeniem mocy zainstalowanych maszyn i urządzeń, a także wyczerpaniem możliwości stosowania prewencji wentylacyjno-chłodniczej. Jest to głównym powodem coraz szerszego stosowania dla poprawy warunków klimatycznych w kopalniach węgla i rud miedzi specjalnych chłodziarek powietrza kopalnianego.

Całkowita zainstalowana moc chłodnicza w polskich kopalniach węgla kamiennego i rud miedzi wg stanu na 12/2005 r. wynosiła 71,2 MW, tj. 45,2 MW mocy chłodniczej 151 chłodziarek lokalnych i 26,0 MW mocy chłodniczej urządzeń chłodniczych klimatyzacji centralnej i grupowej.

W kopalniach węgla kamiennego i rud miedzi pracują następujące lokalne chłodziarki powietrza:

- 18 urządzeń typu LKM produkcji niemieckiej firmy Wende&Malter,
- 90 urządzeń typu DV produkcji niemieckiej GFW,
- 43 urządzenia typu TS produkcji polskiej firmy Termospec.

W polskim górnictwie węgla kamiennego i rud miedzi rozwój techniki klimatyzacyjnej oraz sposobów chłodzenia powietrza kopalnianego przebiegał w kilku etapach [18].

W pierwszym etapie poprawę warunków klimatycznych uzyskiwano przede wszystkim przez dostarczanie dużych ilości powietrza do wyrobisk górniczych. Działania te przestały być jednak skuteczne w miarę schodzenia z eksploatacją na coraz to większe głębokości. W związku z tym w drugim etapie zaczęto stosować lokalne urządzenia chłodnicze o działaniu bezpośrednim i pośrednim o mocach chłodniczych nieprzekraczających 300 kW, przy czym ten sposób ochładzania powietrza jest obec-

nie wiodącym w górnictwie węgla kamiennego i rud miedzi. Kolejnym rozwijanym aktualnie etapem w polskich kopalniach podziemnych jest stosowanie klimatyzacji grupowej i centralnej o wydajnościach kilku MW mocy chłodniczej.

Pierwszymi lokalnymi urządzeniami chłodniczymi stosowanymi na początku lat osiemdziesiątych ubiegłego wieku w polskich kopalniach były chłodziarki WK-120 produkcji NRD, a w kopalniach rud miedzi chłodziarki firmy Wende&Malter. W kopalni węgla kamiennego Halemba na poziomie 1030 m zainstalowano pierwszą polską chłodziarkę powietrza kopalnianego pośredniego działania typu GUC-250P wyprodukowaną przez Wytwórnę Urządzeń Chłodniczych w Dębicy.

Tabela 7.1. Lokalne chłodziarki powietrza – 12/2005 r.

Spółka	Kopalnia	LKM		DV		TS		Ogółem	
		szt.	moc	szt.	moc	szt.	moc	szt.	moc
JASTRZĘBSKA		1	290	33	9810	6	1800	40	11 900
	Borynia	1	290	10	2960	1	300	12	3550
	Jas-Mos			16	4820			16	4820
	Krupiński					2	600	2	600
	Pniówek			4	1160	2	600	6	1760
	Zofiówka			3	870	1	300	4	1170
KOMPANIA		9	2335	28	8420	31	9510	68	20 265
	Marcel					3	900	3	900
	Rydułtowy-Anna	1	290	2	640	2	640	5	1570
	Knurów	1	175	3	930	3	900	7	2005
	Sośnica	4	1160	3	870	5	1500	12	3530
	Szczygłowice	1	130*	4	1220	6	1800	11	3150
	Makoszowy	1	290	2	580	5	1500	8	2370
	Brzeszcze					1	300	1	300
	Bielszowice	1	290	4	1160	2	720	7	2170
	Pokój			2	580	1	350	3	930
	Halemba			5	1570			5	1570
	Polska-Wirek			1	290	1	300	2	590
	Bobrek			2	580	2	600	4	1180
KHW				4	1160	6	2070	10	3230
	Śląsk			3	870	1	420	4	1290
	Staszic					4	1350	4	1350
	Wesoła			1	290	1	300	2	590
Budryk		4	1160	1	290			5	1450
Bogdanka				13	4010			13	4010
Razem KWK		14	3785	79	23 690	43	13 380	136	40 855
KGHM									
	Rudna	4	1160	11	3190			15	4350
Razem		18	4945	90	26 880	43	13 380	151	45 205

* Urządzenie typu MMPR-130 produkcji czeskiej ze sprężarką Trane 3E50 (jak w chłodziarkach typu LKM).

Na początku lat 90. dwudziestego wieku zaczęto stosować w polskich kopalniach podziemnych urządzenia chłodnicze bezpośredniego działania. W kopalniach węgla kamiennego coraz większe zastosowanie znajdują obecnie urządzenia chłodnicze produkowane przez polską firmę Termospec w Żorach. W polskich kopalniach podziemnych stosuje się lokalne chłodziarki powietrza o mocy chłodniczej 130–350 kW, przede wszystkim dla klimatyzacji robót udostępniających i przygotowawczych, a także często dla klimatyzacji robót eksploatacyjnych.

Rodzaje lokalnych chłodziarek powietrza obecnie stosowane w polskim górnictwie podano w tabeli 7.1. W celu zwiększenia efektywności klimatyzowania wyrobisk górniczych wykonano w kopalni Zofiówka i Borynia dołowe systemy klimatyzacji grupowej o mocy chłodniczej po 3 MW. W kopalni Pniówek działa klimatyzacja centralna o mocy chłodniczej 5 MW.

W kopalni rudy miedzi Rudna w fazie końcowej jest obecnie budowa nowoczesnej klimatyzacji centralnej o mocy chłodniczej 15 MW. W zagłębiu miedziowym oprócz chłodziarek bezpośredniego działania typu LKM i DV stosuje się klimatyzowanie kabin niektórych samojezdnych maszyn górniczych o napędzie spalinowym.

8. Charakterystyka urządzeń chłodniczych powietrza kopalnianego stosowanych w polskim górnictwie podziemnym

W polskim górnictwie węgla kamiennego i rud miedzi stosuje się różne typy urządzeń chłodniczych powietrza kopalnianego. Spośród wymienionych typów chłodziarek powietrza (rozdz. 7) systematycznie, w miarę zużywania się, złomowane są stare urządzenia LKM i DV. Produkcja chłodziarek typu LKM została zaniechana, a w ich miejsce są wprowadzane w coraz szerszym zakresie chłodziarki bezpośredniego działania typu TS i DV.

8.1. Urządzenia chłodnicze typu LKM

8.1.1. Chłodziarki bezpośredniego działania typu LKM

Chłodziarki bezpośredniego działania typu LKM (rys. 8.1, 8.2, tabela 8.1) są przeznaczone do schładzania powietrza w podziemnych wyrobiskach kopalń i dopuszczone do pracy w pomieszczeniach zaliczonych do stopnia a, b i c zagrożenia wybuchem metanu.

Urządzenia te składają się z następujących podstawowych części:

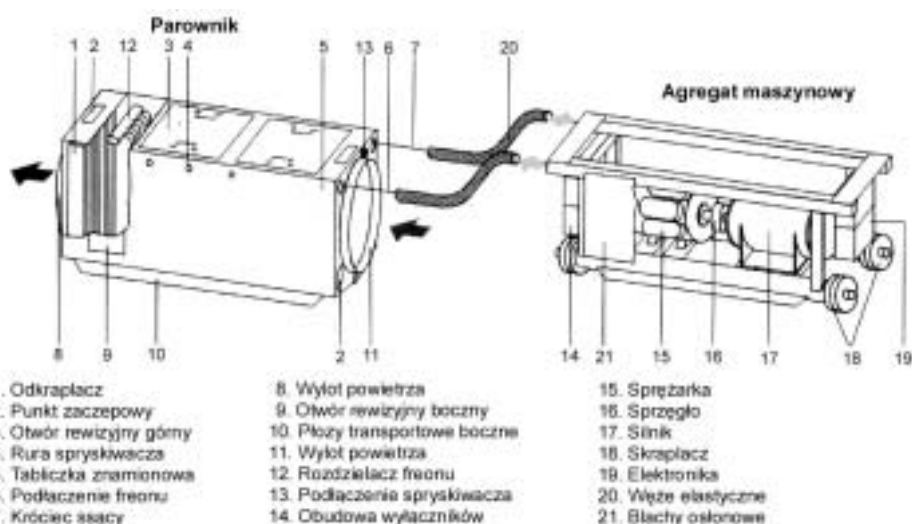
- sprężarki,
- skraplacza (kondensatora),
- zaworu regulacyjnego (rozprężnego),
- parownika,
- obiegu wody chłodzącej skraplacz (otwartego lub zamkniętego z chłodnicą wyparną wody),
- urządzeń zabezpieczających ruch maszyny i sterowania elektrycznego.

Wymienione urządzenia składają się z dwóch zespołów:

- w pierwszym umieszczono agregat sprężarkowy, skraplacz i elektryczne urządzenia sterujące,
- w drugim mieści się parownik.

Tabela 8.1. Dane techniczne urządzeń chłodniczych LKM

Typ zespołu maszynowego	LKM2-175	LKM2-235	LKM2-290
Typ sprężarki	Trane 3E50	Trane 3E60	Trane 3E80
Wydajność sprężarki, m ³ /h	217	247	330
Moc zainstalowana /pobierana silnika elektrycznego, kW	55/42	55/52	90/68
Typ skraplacza	KO 40	KO 50	KO 63
Moc chłodnicza skraplacza, kW	217	287	358
Temperatura wody na wlocie, °C	20÷25	20÷25	20÷25
Temperatura wody na wylocie, °C	45÷48	45÷48	45÷48
Strumień wody obieg otwarty, m ³ /h	9,25	11,80	15,35
Strumień wody obieg zamknięty, m ³ /h	18,50	23,60	30,70
Typ parownika	WKF 54F	WKF 63RV	WKF 82RV
Moc chłodnicza, kW	175	235	290
Strumień powietrza, m ³ /s	5,0	6,6	7,5
Temperatura powietrza na wlocie, °C	31	31	31
Temperatura powietrza na wylocie, °C	20	20	20



Rys. 8.1. Schemat urządzenia chłodniczego typu LKM firmy Wende&Malter

Ustalane parametry pracy tych maszyn są kontrolowane i regulowane samoczynnie.

Zespół maszynowy chłodziarki LKM2-290 składa się z następujących elementów:

- rama nośna wraz z płytami osłonowymi i zawieszami,
- sprężarka tłokowa typu TRANE 3E80 wraz z silnikiem i sprzęgłem,
- skraplacz,
- odkraplacz,

- zawór bezpieczeństwa,
- zawór rozprężny,
- urządzenia kontrolno-pomiarowe i zabezpieczające.



Rys.8.2. Chłodziarka powietrza typu LKM2-290



Rys. 8.3. Chłodnica powietrza (parownik) urządzenia typu LKM2-290

W skład chłodnicy powietrza (parownika, rys. 8.3) tej chłodziarki wchodzi następujące elementy:

- obudowa stalowa wraz z wanną spływową i zawieszami,
- zespół węzownic z rurek miedzianych wraz z kolektorami rozprężnym i powrotnym,
- zespół dysz spłukujących,
- odkraplacz wody.

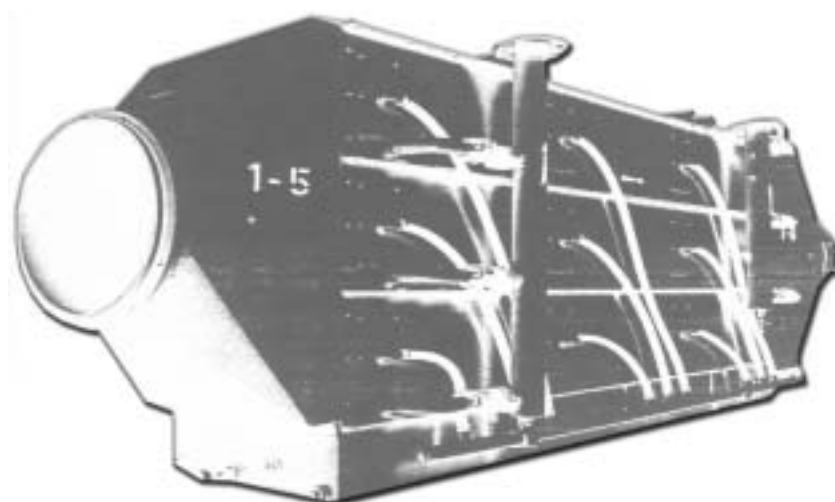
Charakterystykę techniczną chłodnic wyparnych stosowanych w urządzeniach chłodniczych typu LKM podano w tabeli 8.2.

W skład chłodnicy wyparnej wody (rys. 8.4) wchodzi następujące elementy:

- sztywna obudowa z blach stalowych wyposażona w płozы do transportu urządzenia po spągu oraz w uchwyty do podwieszania na kolejce podwieszanej,
- pakiet miedzianych rur chłodzących,
- zespół zraszający,
- oddzielnik skroplin.

Tabela 8.2. Dane techniczne chłodnic wyparnej wody

Typ	RKH 70 RV	RKH 82 RV	RKH 105 RV
Moc chłodnicza, kW	220	290	360
Przepływ wody, m ³ /h	17,20	22,70	28,20
Temperatura wody na wlocie, °C	43	43	43
Temperatura wody na wylocie, °C	32	32	32
Strumień powietrza, m ³ /s	5,5	7,5	9,2
Wymiary gabarytowe:			
szerokość, mm	615	710	900
wysokość, mm	1300	1300	1300
długość, mm	4300	4300	4300



Rys. 8.4. Chłodnica wyparna wody typu RKH 82RV

8.1.2. Urządzenia chłodnicze pośredniego działania typu LKM

Firma Wende&Malter produkowała urządzenia chłodnicze pośredniego działania: typu LKM 300–620 (rys. 8.5) ze sprężarkami tłokowymi o mocach chłodniczych 300–620 kW oraz typu LKM 600–1400 z sprężarkami śrubowymi o mocach chłodniczych 600, 800, 1000, 1200 i 1400 kW.

Zespół maszynowy tej chłodziarki składa się z następujących elementów:

- sprężarki tłokowej z silnikiem i sprzęgłem,
- ramy nośnej ze skraplaczem i parownikiem,
- układu sterowania i zabezpieczeń.

Do chłodziarek pośredniego działania stosuje się przeponowe wodne chłodnice powietrza o mocy 200–300 kW oraz chłodnice wyparne wody o mocach 300–500 kW.



Rys. 8.5. Urządzenie chłodnicze typu LKM 300–620

8.2. Urządzenia chłodnicze typu DV

8.2.1. Chłodziarki bezpośredniego działania typu DV

Urządzenia chłodnicze bezpośredniego działania typu DV-150, DV-290 i DV-350 (tabela 8.3) są produkowane przez niemiecką firmę Gesellschaft für Wärmetechnik (GFW). Są to urządzenia niestacjonarne o działaniu bezpośrednim (rys. 8.6).

Zespół maszynowy chłodziarek typu DV składa się z następujących elementów [18]:

- ramy z rury czworokątnej wraz z wanną podłogową,
- sprężarki typu CARRIER,
- silnika elektrycznego,
- sprzęgła oponowego,
- skrzynki wyłączników zabezpieczających,
- obwodów sterowania temperaturą obudowy skraplacza,
- tablicy manometrów: parownika, skraplacza i ciśnienia oleju,
- filtra osuszającego środka chłodzącego,
- podwójnych skraplaczy chłodzonych wodą.



Rys. 8.6. Chłodziarka bezpośredniego działania typu DV-290

Tabela 8.3. Parametry techniczne chłodziarek bezpośredniego działania typu DV

Urządzenie chłodnicze	DV-150	DV-290	DV-350
Wydajność chłodnicza, kW	151	289	348
Temperatura parowania, °C	2,0	2,0	2,0
Temperatura skraplania, °C	45,0	45,0	46,0
Strumień objętości powietrza, m ³ /s	6,7	10,0	13,3
Temperatura powietrza na wejściu, °C	32,0	32,0	32,0
Temperatura powietrza na wyjściu, °C	24,8	22,8	23,7
Wilgotność właściwa powietrza na wejściu, g/kg	19,7	19,7	19,7
Wilgotność właściwa powietrza na wyjściu, g/kg	15,5	14,4	14,9
Moc chłodnicza skraplacza, kW	186	354	435
Producent sprężarki	CARRIER	CARRIER	CARRIER
Typ sprężarki	5H60	5H86	5H126
Liczba obrotów, min ⁻¹	1450	1450	1450
Moc napędowa, kW	35	65	87

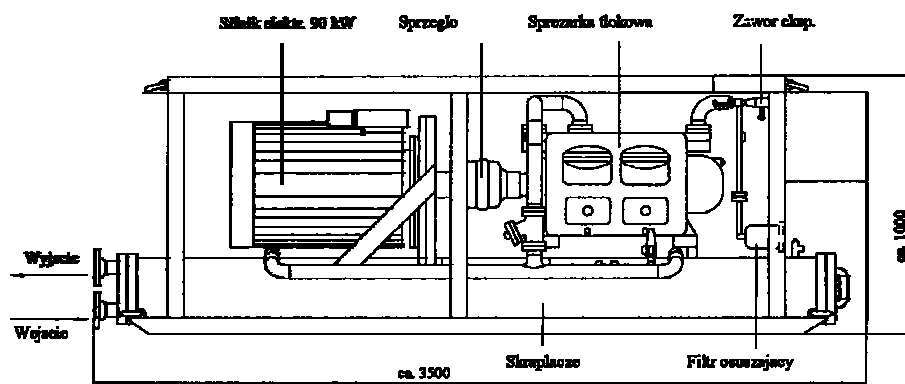
Przepływ czynnika chłodniczego między zespołem maszynowym a chłodnicą powietrza (parownikiem) odbywa się stalowymi elastycznymi węzami.

Zespół maszynowy urządzenia chłodniczego typu DV-290 (rys. 8.7) współpracuje z chłodnicą powietrza–parownikiem mocy 290 kW, a zespół maszynowy typu DV-350 z podwójną chłodnicą–parownikiem mocy 350 kW (rys. 8.8).

W skład chłodnicy powietrza (parownika) wchodzi [18]:

- wymiennik ciepła w postaci pakietu rur z miedzi,
- obudowa z blachy stalowej,
- siatka zabezpieczająca wlot i wylot powietrza,
- kształtka przejściowa jako przyłącze do wentylatora,
- oddzielacz wody,
- słupowy rozdzielacz wraz z dyszami splukującymi,
- wentylator.

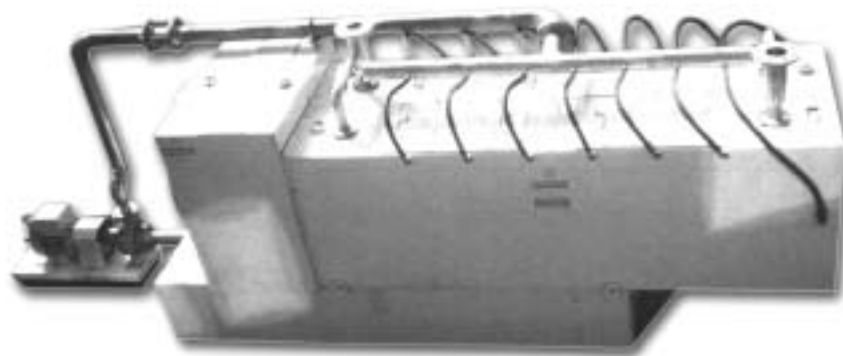
Woda z obiegu skraplacza jest chłodzona w chłodnicy wyparnej wody typu RK-450 (rys. 8.9). Chłodnica wyparna wody odbiera ciepło z wody chłodzącej skraplacz zespołu maszynowego urządzenia chłodniczego typu DV i przekazuje je do zużytego prądu powietrza wypływającego z robót górniczych.



Rys. 8.7. Schemat zespołu maszynowego urządzenia chłodniczego typu DV-290 [41]



Rys. 8.8. Chłodnica powietrza (podwójny parownik) urządzenia typu DV-350



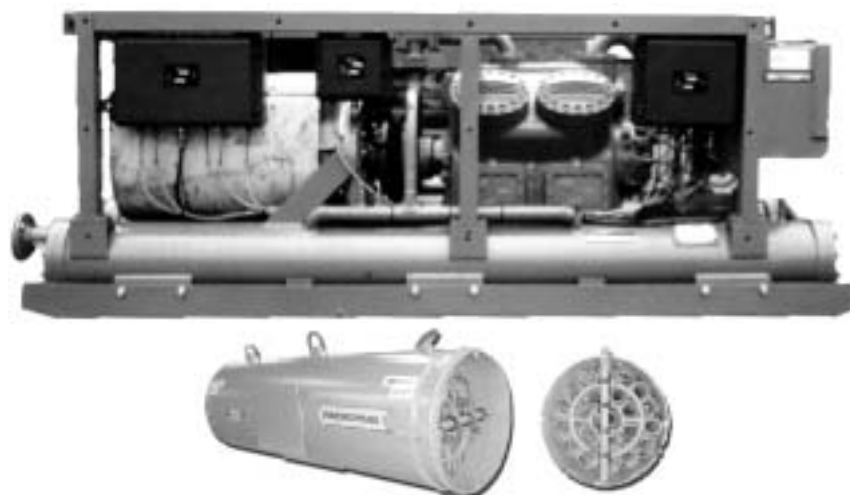
Rys. 8.9. Wyparna chłodnica wody typu RK-450

8.2.2. Urządzenia chłodnicze pośredniego działania typu IDV

Firma Gesellschaft für Wärmetechnik (GFW) obecnie Warme-Austausch-Technik GmbH (WAT) produkuje urządzenia chłodnicze pośredniego działania: o mocy chłodniczej 290–350 kW i 1–3 MW (rys. 8.10, rys. 8.11, tabela 8.4).

Urządzenia chłodnicze typu IDV są niestacjonarnymi urządzeniami o działaniu pośrednim średniej mocy. Do zespołu maszynowego chłodziarki typu DV w miejsce parownika–chłodnicy powietrza bezpośredniego działania, zastosowano parownik płaszczowo-rurowy pośredniego działania, w którym jest chłodzona woda. Chłodziarki tego typu stosuje się do zasilania wodą zimną 8–10 szt. chłodniczek ścianowych typu SPK-35 o mocy 30 kW.

Stacjonarnymi urządzeniami chłodniczymi pośredniego działania o mocy chłodniczej 1–3 MW są urządzenia chłodnicze typu KM (rys. 8.11, tabela 8.5).



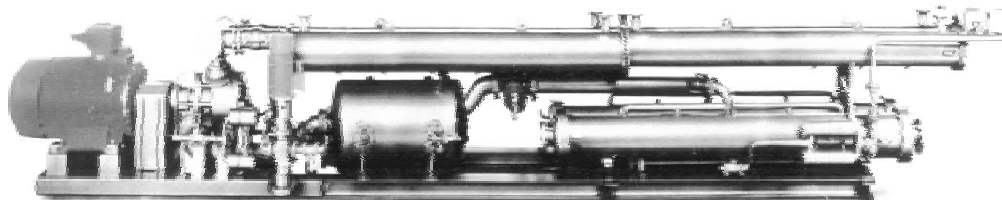
Rys. 8.10. Zespół maszynowy chłodziarki pośredniego działania typu IDV-290 i chłodnica ścianowa SPK-35

Tabela 8.4. Dane techniczne urządzeń chłodniczych typ IDV

Wyszczególnienie	IDV-290	IDV-350
Wydajność chłodnicza, kW	289	348
Temperatura parowania, °C	2,0	2,0
Temperatura skraplania, °C	45,0	46,0
Moc chłodnicza parownika, kW	290	350
Moc chłodnicza skraplacza, kW	354	435
Sprężarka		
Producent	Carrier	Carrier
Typ	5H86	5H120
Liczba obrotów, min ⁻¹	1450	1450
Moc napędowa, kW	65	87

Tabela 8.5. Dane techniczne agregatów chłodzących wodę typu KM

Wyszczególnienie	KM 1000	KM 2000	KM 3000
PAROWNIK			
Typ parownika	Płaszczowo-rurowy	Płaszczowo-rurowy	Płaszczowo-rurowy
Wydajność chłodnicza, kW	925	1750	2600
Powierzchnia wymiennika, m ²	114	216	310
Temperatura parowania, °C	0,0	0,0	0,0
Temperatura wody na wejściu, °C	18,0	18,0	18,0
Temperatura wody na wyjściu, °C	3,0	3,0	3,0
Wydatek wody chłodzonej, kg/h	54 700	104 000	149 000
SKRAPLACZ			
Typ skraplacza	Płaszczowo-rurowy	Płaszczowo-rurowy	Płaszczowo-rurowy
Moc chłodnicza, kW	1225	2300	3390
Powierzchnia wymiennika, m ²	200	331	374
Temperatura skraplania, °C	43,0	43,0	44,0
Temperatura wody na wejściu, °C	31,0	31,0	31,0
Temperatura wody na wyjściu, °C	40,0	40,0	41,0
Wydatek wody chłodzącej, kg/h	117 000	220 000	290 000
SPRĘŻARKA			
Producent	APV Baker L	APV Baker L	APV Baker L
Typ sprężarki	HS 2028	HS 2035	HS 2231
Liczba obrotów, min ⁻¹	2980	2980	2980
Moc napędowa, kW	275	500	790



Rys. 8.11. Agregat chłodzący wodę typu KM-2000

Do chłodziarek pośredniego działania typu KM stosuje się:

- przeponowe wodne chłodnice powietrza typu DV, SPK i GK o mocy chłodniczej 250–700 kW,
- chłodnice wyparne wody typu RK o mocach chłodniczych 250–450 kW i typu SPRK o mocy 890 kW.

8.3. Urządzenia chłodnicze typu TS

8.3.1. Chłodziarki bezpośredniego działania typu TS

Urządzenia chłodnicze typu TS (tabela 8.6) są produkowane przez firmę Termospec w Żorach. Chłodziarki bezpośredniego działania typu TS-300/1 i TS-350/1 są przeznaczone do chłodzenia powietrza kopalnianego w wyrobiskach górniczych zaliczonych do stopnia a, b i c zagrożenia wybuchowym metanu, a także do klimatyzowania tuneli drogowych lub kolejowych. Składają się one z zespołu maszynowego, parownika i chłodnicy wyparnej.

Tabela 8.6. Parametry techniczne chłodziarek bezpośredniego działania typu TS

Typ chłodziarki	TS-300/1	TS-350/1
Typ zespołu maszynowego	TS-300/ZM-1	TS-350/ZM-1
Moc chłodnicza, kW	300	350
Sprężarka	5H86	5H126
Typ silnika elektrycznego budowy przeciwbuchowej z osłoną ognioszczelną	dSg-280M4 lub 3SGf-280M4	dSg-280M4 lub 3SGf-280M4
Moc silnika, kW	90	90 (110)
Obroty silnika, min ⁻¹	~1485	~1485
Napięcie zasilania, V	500 lub 1000	500 lub 1000
Rodzaj czynnika chłodzącego	R507 R404A R407C	R507 R404A R407C
Ilość freonu w obiegu, kg	100	120
Układ chłodzenia skraplacza	zamknięty lub otwarty	zamknięty lub otwarty
Przepływ wody w obiegu skraplacza, m ³ /h	18÷36	20÷40

Zespół maszynowy (rys. 8.12) chłodziarek powietrza bezpośredniego działania typu TS składa się z następujących elementów:

- ramy nośnej wraz z płytami osłonowymi,
- sprężarki tłokowej typu Carrier,
- silnika i sprzęgła oponowego,
- skraplacza płaszczowo-rurowego,
- filtra,
- manometrów pomiarowych,
- skrzynki z aparaturą pomiarową.

Urządzenia chłodnicze typu TS są wyposażone w płozy do transportu po spągu wyrobisk górniczych.



Rys. 8.12. Zespół maszynowy urządzenia chłodniczego typu TS-300/ZM-1

W chłodziarkach bezpośredniego działania typu TS stosuje się parowniki–chłodnice powietrza typu TS/P (rys. 8.13). Parowniki te składają się z następujących elementów [18]:

- obudowy stalowej wraz z wanną sphywową i zawieszami,
- zespołu węzownic z rurek miedziowych wraz z kolektorami rozprężnym i powrotnym,
- zespołu dysz spłukujących,
- odkraplacza wody.

Ważniejsze dane techniczne parowników TS/P podano w tabeli 8.7.

Skrapacze typu płaszczowo-rurowego wymienionych chłodziarek chłodzi się wodą w obiegu zamkniętym w chłodnicach wyparnych typu CWW-420,460 (rys. 8.14). Podstawowe dane techniczne chłodnic wyparnych wody typu CWW przedstawiono w tabeli 8.8 [18].



Rys. 8.13. Parownik–chłodnica powietrza typu TS-300/P

Tabela 8.7. Dane techniczne parowników–chłodnic powietrza typu TS/P

Typ parownika	TS-300/P	TS-350/P
Wymiary gabarytowe:		
wysokość, mm	1100	1100
szerokość, mm	870	870
długość, mm	3000	3000
Masa, kg	2570	2650
Moc chłodnicza, kW	300	350
Powierzchnia wymiany ciepła, m ²	77,6	87,3
Przepływ powietrza, m ³ /s	10	10
Spadek naporu powietrza, Pa	1000	1000
Temperatura powietrza na wlocie, °C	32	32
Temperatura powietrza na wylocie, °C	20	19,6
Ilość wykropnionej wody, kg/h	269	289



Rys. 8.14. Chłodnica wyparna wody typu CWW-420

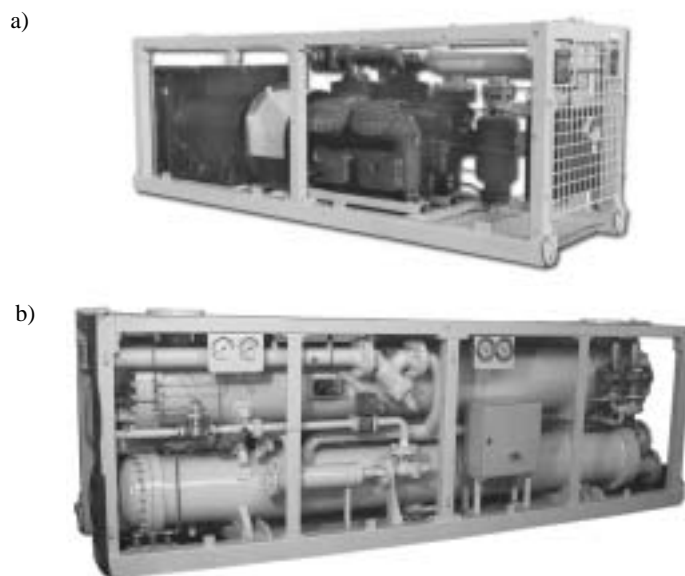
Tabela 8.8. Dane techniczne chłodnic wyparnych wody typu CWW

Typ chłodnicy wyparnej	CWW-300	CWW-420	CWW-460	CWW-600
Wymiary gabarytowe:				
wysokość, mm	1900	1000	1000	1640
szerokość, mm	900	1090	1090	1220
długość, mm	3550	3550	3550	3550
Masa, kg	1850	2650	2720	3900
Moc chłodnicza, kW	310	420	460	556
Powierzchnia wymiany ciepła, m ²	105,3	132,6	142,8	189,6
Przepływ powietrza, m ³ /s	7,5	10	10	12
Dyssypacja energii, Pa	800	1000	1000	1000
Temperatura powietrza na wlocie, °C	26,0	26,0	26,0	26,0
Temperatura powietrza na wylocie, °C	30,4	30,2	31,2	31,2
Ilość odparowanej wody, kg/h	394	521	582	699
Przepływ wody chłodzącej, kg/s	7,5	10	10	13,3
Temperatura wody na wlocie, °C	40	40	40	40
Temperatura wody na wylocie, °C	30	30	30	30

8.3.2. Urządzenia chłodnicze pośredniego działania typu TS

Firma Termospec produkuje również urządzenie chłodnicze pośredniego działania typu TS-450P (rys. 8.15, tabela 8.9) o nominalnej mocy chłodniczej 420 kW. Chłodziarka ta składa się z zespołu:

- a) sprężarka–silnik i zespołu,
- b) parownik–skraplacz.



Rys. 8.15. Chłodziarka pośredniego działania typu TS –450P

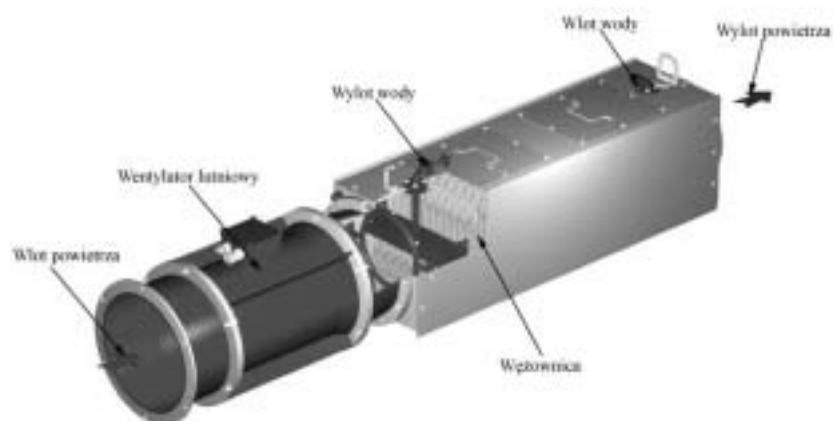
Tablica 8.9. Dane techniczne chłodziarki TS-450P

Moc chłodnicza nominalna	420 kW
Sprężarka – typ	Carrier 5H126
Moc i obroty silnika	132 kW, 1 485 obr./min
Napięcie zasilania	1000V lub 500, 50Hz
Pobór mocy dla warunków nominalnych	100 do 112 kW
Czynnik chłodniczy	HFC: R404A, R507, R407C, R419A
Parownik – typ, moc chłodnicza	plaszczowo-rurowy, 450 kW
Temperatura parowania	0÷5 °C
Temperatura wody zimnej wylot-wlot	4÷5 °C–15÷20 °C
Strumień wody zimnej	8÷10 kg/s
Skraplacz – typ, moc chłodnicza znamionowa	plaszczowo-rurowy, 560 kW
Temperatura skraplania	+40÷45 °C
Strumień wody chłodzącej skraplacz	10÷20,0 kg/s (36,0÷72,0 m ³ /h)
Temperatura wody chłodzącej skraplacz wlot/wylot	28÷32 °C/36÷40 °C

Do chłodziarki pośredniego działania typu TS-450P mogą być zastosowane: przepływowe wodne chłodnice powietrza typu CP o mocy chłodniczej 200–300 kW (rys. 8.16), chłodnice ścienne SCP-35 o mocy chłodniczej 20–35 kW (rys. 8.17), chłodnice wyparne wody typu CWW o mocy chłodniczej 300–600 kW (rys. 8.14).



Rys. 8.16. Schemat chłodnicy powietrza typu CP-200



Rys. 8.17. Ściana chłodnica powietrza typu SCP-35

Podstawowe dane techniczne chłodnic powietrza typu CP i SCP, które współpracują z urządzeniem chłodniczym TS-450P, przedstawiono w tabeli 8.10.

Tabela 8.10. Dane techniczne chłodnic powietrza typu CP i SCP

Typ chłodnicy	CP-200	CP-250	CP-300	SCP-35
Moc znamionowa, kW	200	250	300	35
Wymiary gabarytowe:				
wysokość, mm	950	950	950	460
szerokość, mm	820	860	900	410
długość, mm	2750	2850	2850	1550
Masa, kg	1450	1500	1600	220
Dyssypacja energii, Pa	800	900	1000	600
Przepływ powietrza, m ³ /s	6,0	7,5	10,0	1,5
Temperatura powietrza na wlocie, °C	32	32	32	30
Temperatura powietrza na wylocie, °C	21	21	22	15
Ilość wykropionej wody, kg/h	195,4	228,1	266,1	–

9. Systemy klimatyzacyjne kopalń podziemnych

W polskich kopalniach węgla i rud miedzi stosuje się wiele różnorodnych systemów chłodzenia powietrza kopalnianego. Do klimatyzacji robót przodkowych drażonych chodników i przekopów, a także bardzo często ścian eksploatacyjnych korzysta się przede wszystkim z urządzeń lokalnych o średniej mocy chłodniczej 130–450 kW [19]. Rodzaje stosowanych lokalnych urządzeń chłodniczych w polskim górnictwie podziemnym wyszczególniono w tabeli 7.1.

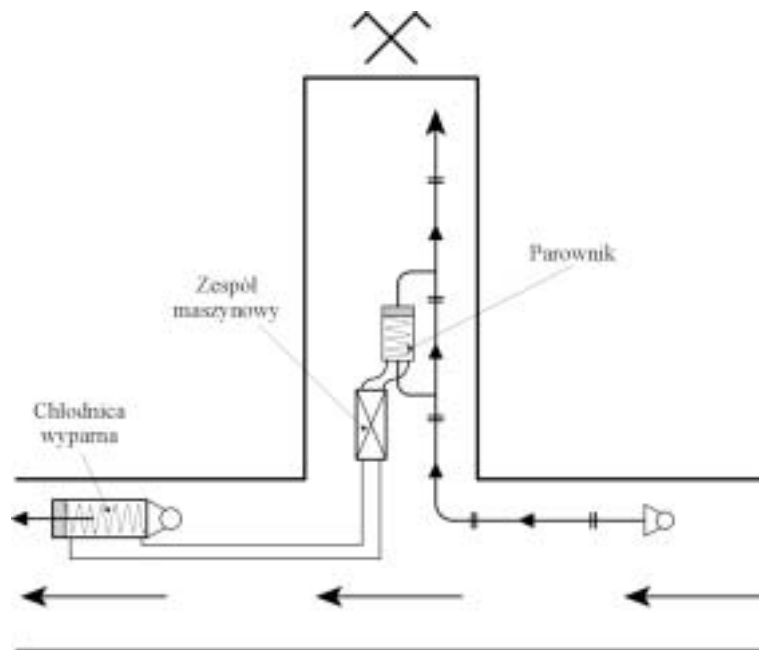
W wielu rejonach kopalń podziemnych stosowanie pojedynczych lub kilku urządzeń chłodniczych średniej mocy okazało się niewystarczające, a także nieefektywne ekonomicznie [19]. Dlatego też wprowadzono w latach 2003–2005 do kopalń o trudnych warunkach klimatycznych urządzenia chłodnicze o mocy ponad 1 MW dla systemów klimatyzacji grupowej.

9.1. Klimatyzacja lokalna

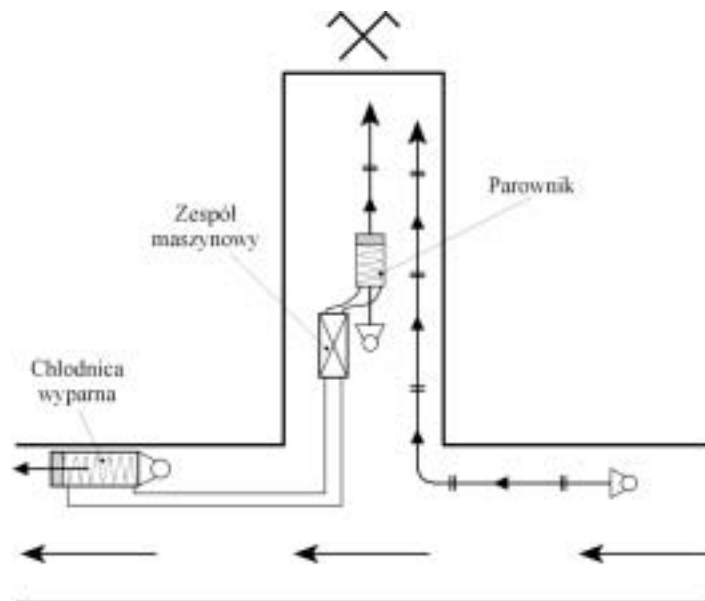
W kopalniach węgla kamiennego i rud miedzi lokalne urządzenia chłodnicze o mocy do około 300 kW są stosowane przede wszystkim do schładzania powietrza w drażonych wyrobiskach przewietrzanych lutniociągami (rys. 9.1–9.8). Takie urządzenia są także stosowane do schładzania powietrza w ścianach (rys. 9.9–9.11).

Praktyczne sposoby lokalizacji urządzeń chłodniczych bezpośredniego działania do ochładzania powietrza w drażonych chodnikach i w ścianach eksploatacyjnych w kopalniach węgla kamiennego ilustrują rysunki 9.12–9.18.

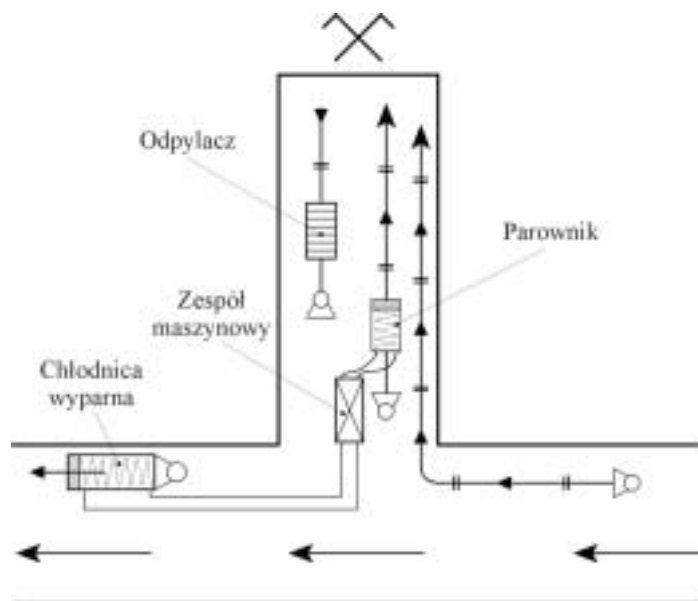
Do chłodzenia powietrza w ścianie, chodniku przejściowym i w drażonym wyrobisku przewietrzanym lutniociągiem może znaleźć zastosowanie lokalne urządzenie chłodnicze pośredniego działania przedstawione na rys. 9.19.



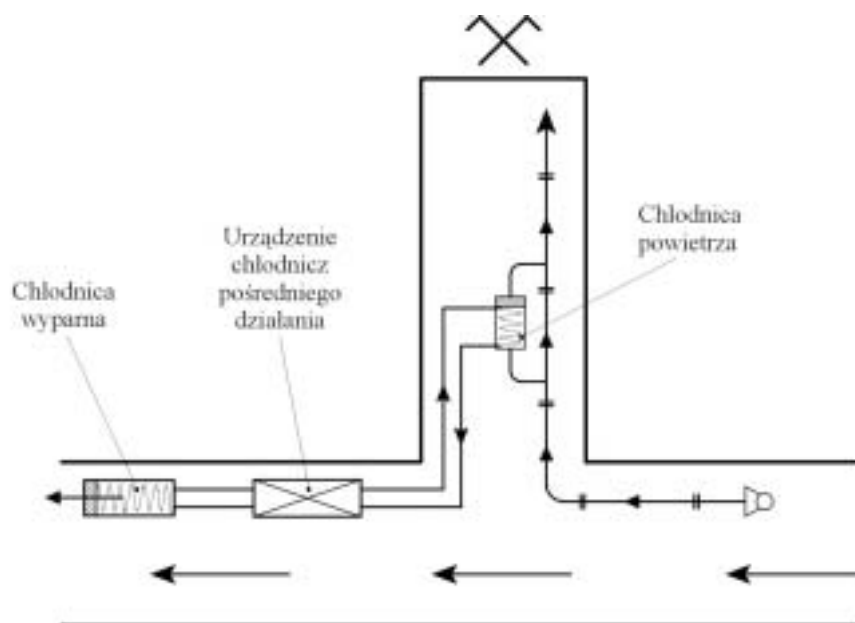
Rys. 9.1. Zastosowanie urządzenia chłodniczego bezpośredniego działania o mocy około 300 kW do chłodzenia powietrza w drążonym wyrobisku przewietrzanym lutniociągami tłoczącym



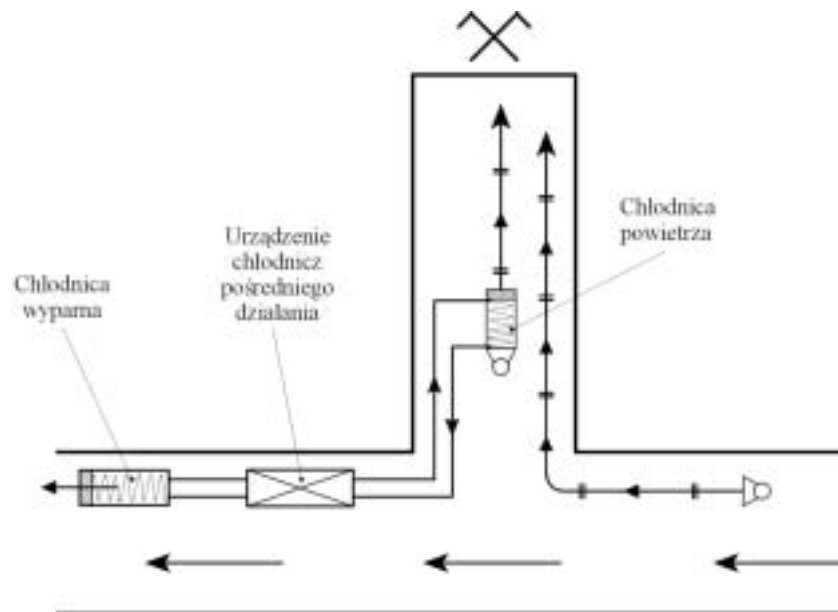
Rys. 9.2. Zastosowanie urządzenia chłodniczego bezpośredniego działania do chłodzenia powietrza w drążonym wyrobisku przewietrzanym kombinowaną wentylacją lutniową



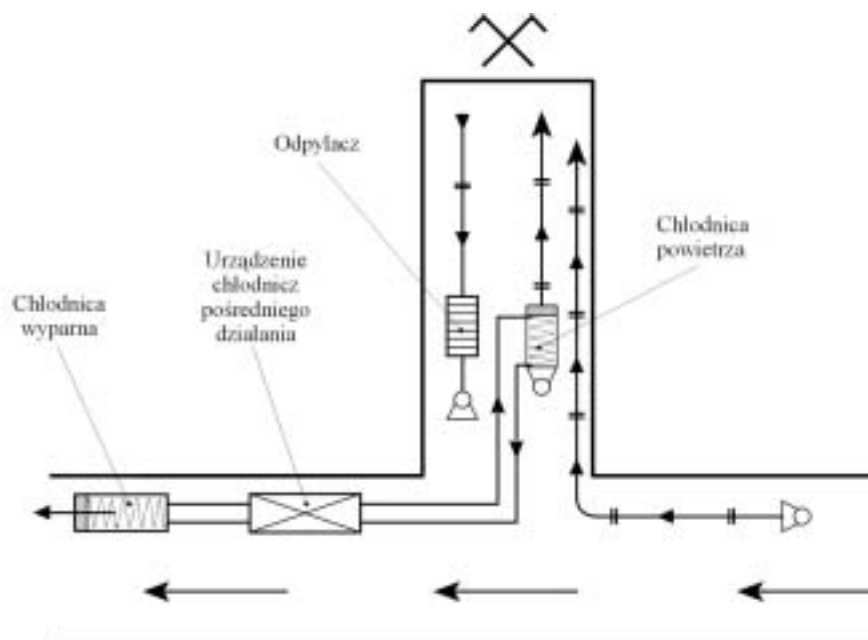
Rys. 9.3. Zastosowanie odpylacza powietrza i urządzenia chłodniczego bezpośredniego działania do ochładzania powietrza w drążonym chodniku



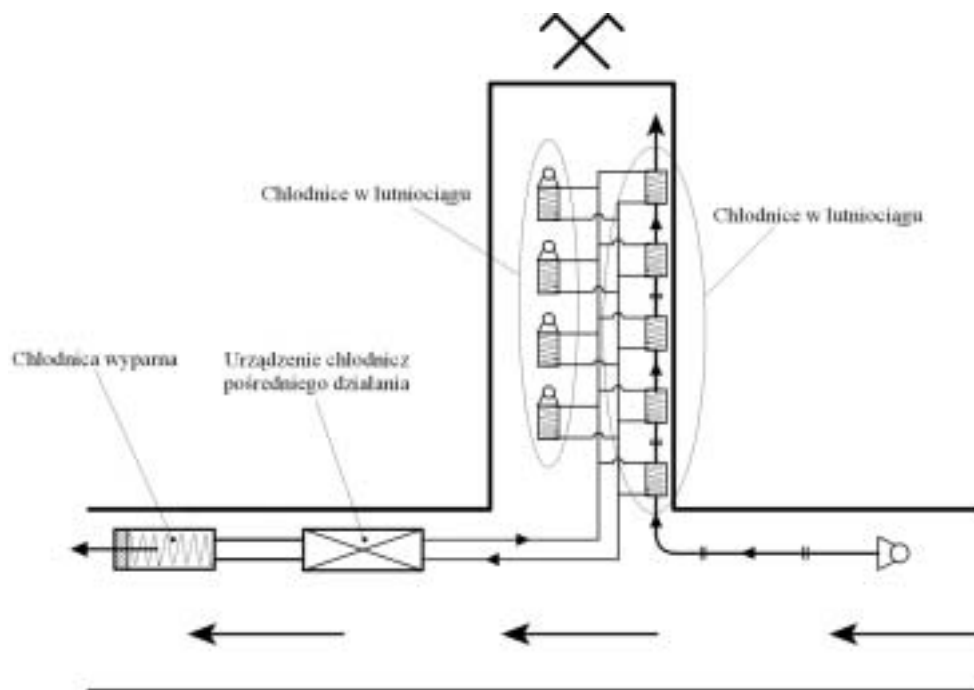
Rys. 9.4. Zastosowanie urządzenia chłodniczego pośredniego działania do ochładzania powietrza w drążonym wyrobisku przewietrzanym lutniociągim tłoczonym



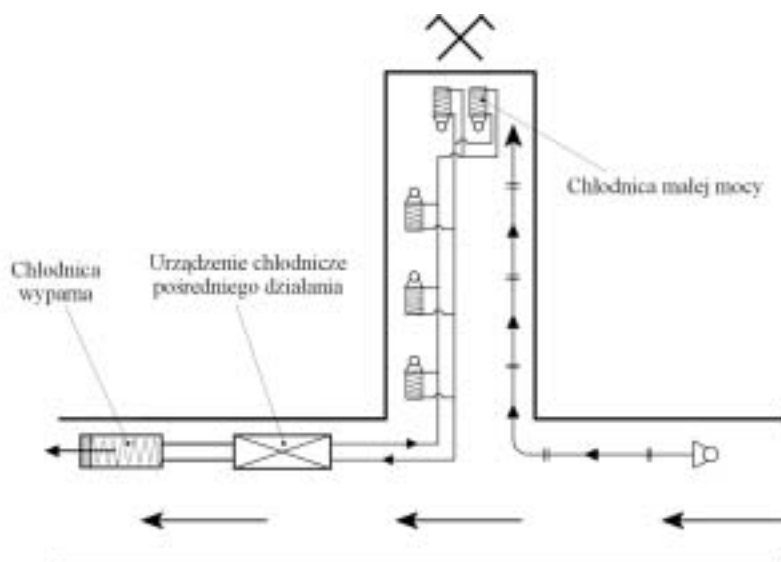
Rys. 9.5. Zastosowanie urządzenia chłodniczego pośredniego działania do chłodzenia powietrza w drażonym wyrobisku przewietrzanym kombinowaną wentylacją lutniową



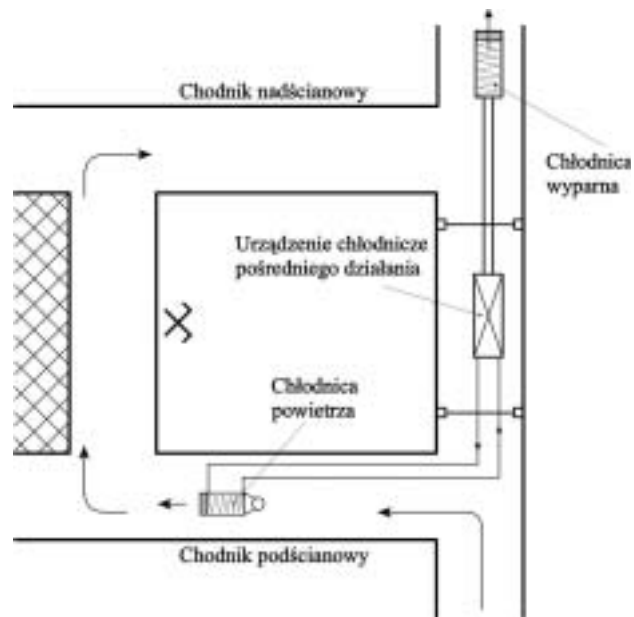
Rys. 9.6. Zastosowanie w systemie wentylacji kombinowanej odpyłacza powietrza i urządzenia chłodniczego pośredniego działania do chłodzenia powietrza w chodniku



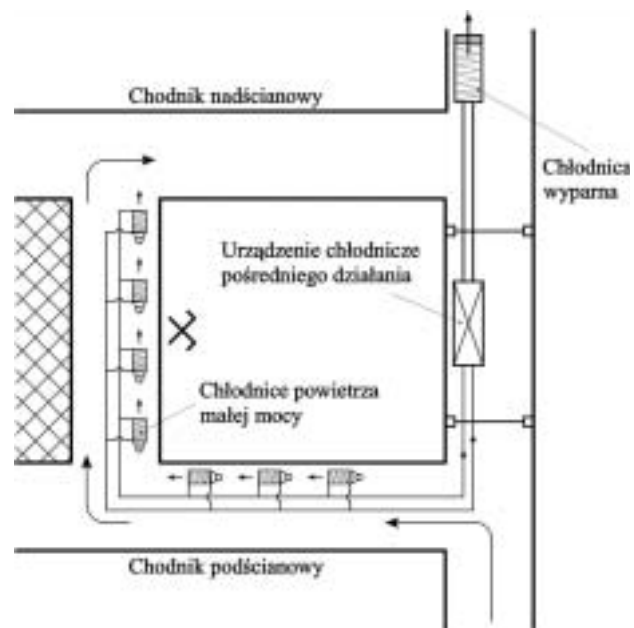
Rys. 9.7. Zastosowanie urządzenia chłodniczego pośredniego działania z chłodnicami powietrza małej mocy zabudowanymi w lutniociągu



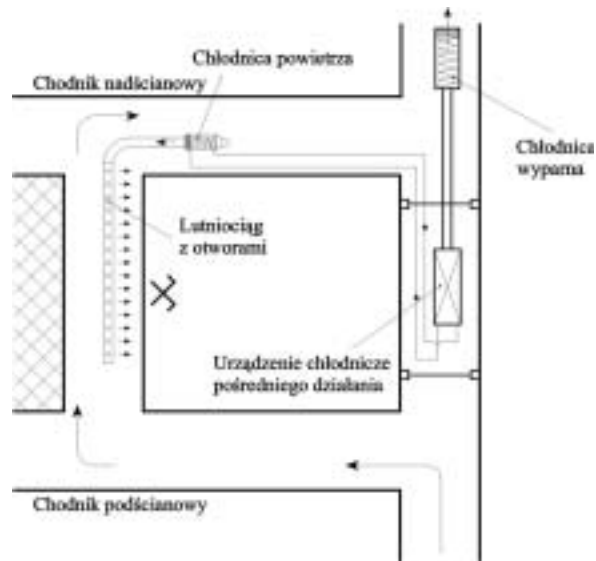
Rys. 9.8. Zastosowanie urządzenia chłodniczego pośredniego działania z chłodnicami powietrza małej mocy rozmieszczonymi wzdłuż drażonego chodnika



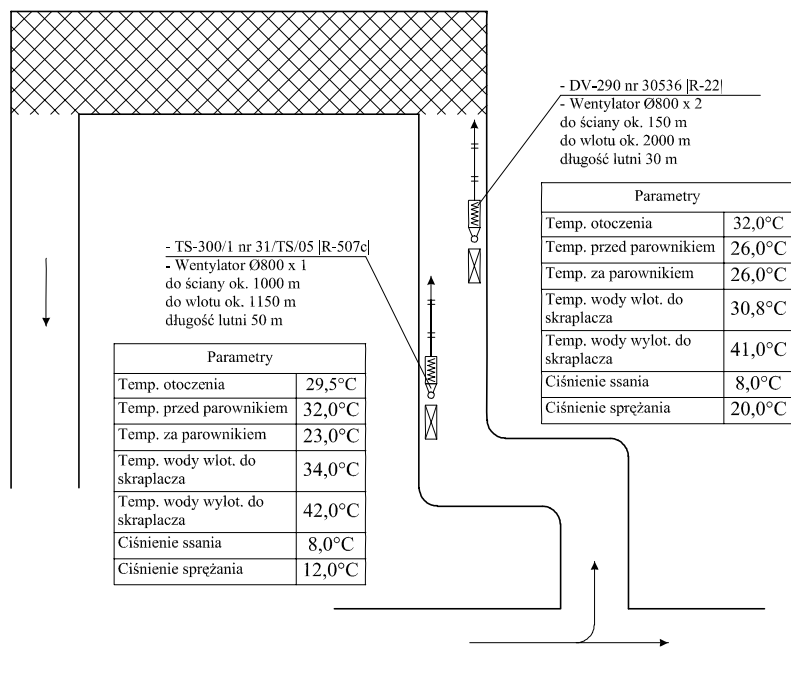
Rys. 9.9. Zastosowanie urządzenia chłodniczego bezpośredniego działania do schładzania powietrza w rejonie ściany wydobywczej



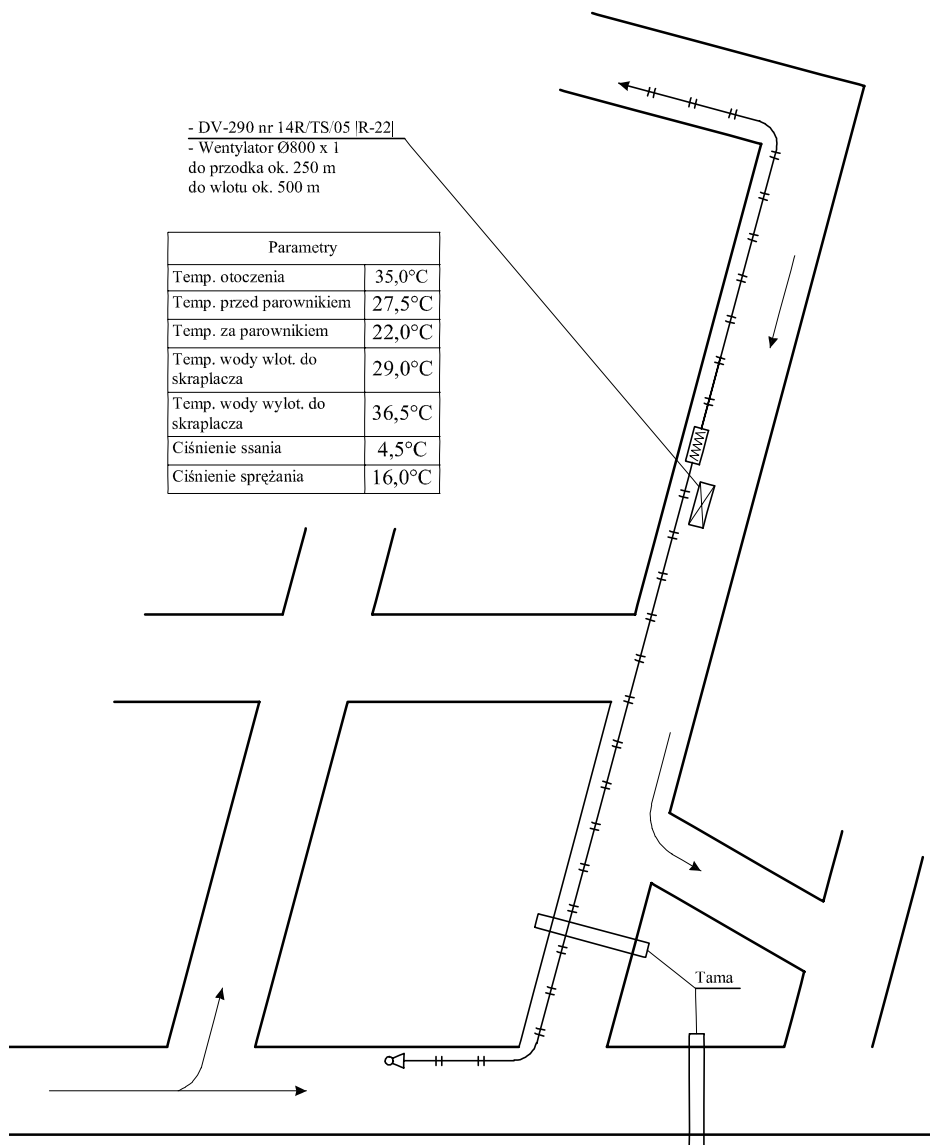
Rys. 9.10. Zastosowanie urządzenia chłodniczego pośredniego działania z chłodnicami powietrza małej mocy rozmieszczonymi wzdłuż chodnika podścianowego i ściany



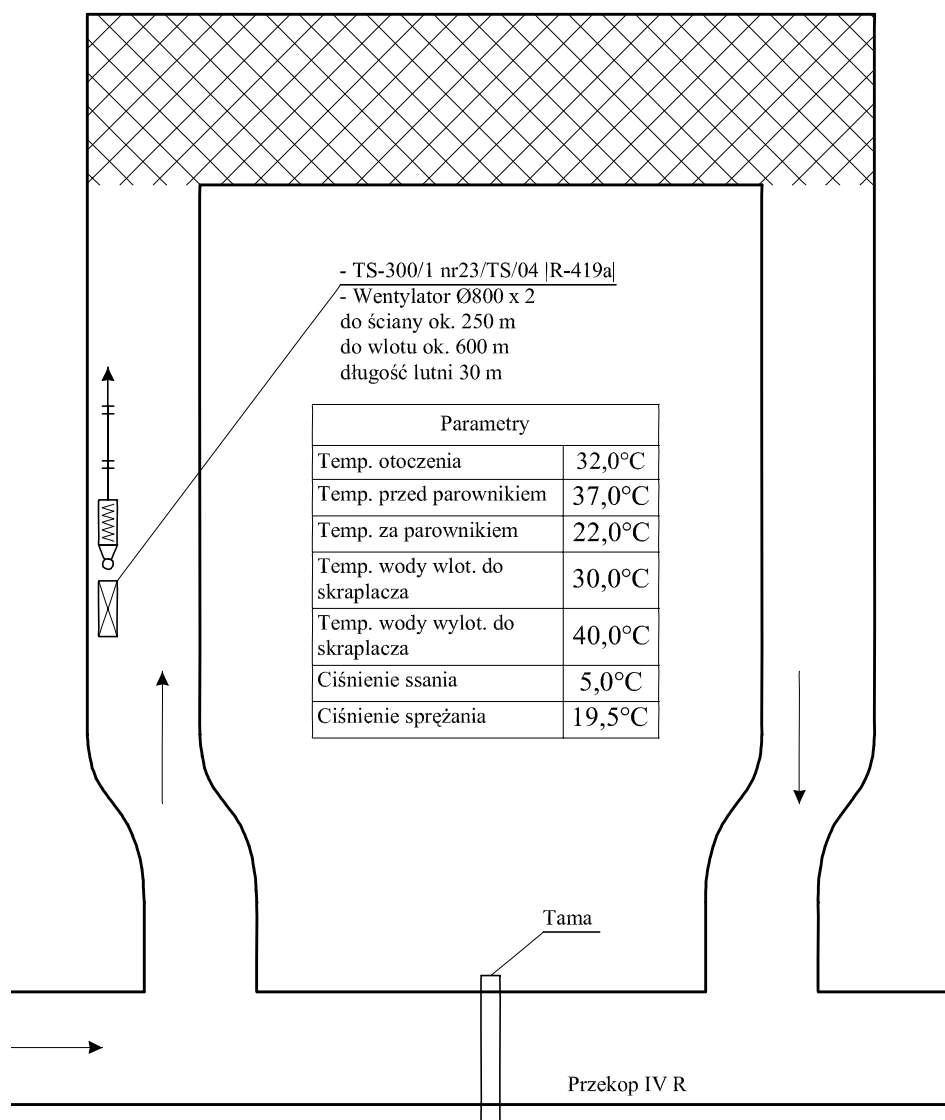
Rys. 9.11. Zastosowanie urządzenia chłodniczego pośredniego działania z lutniociągiem do ochładzania powietrza w przestrzeni roboczej ściany



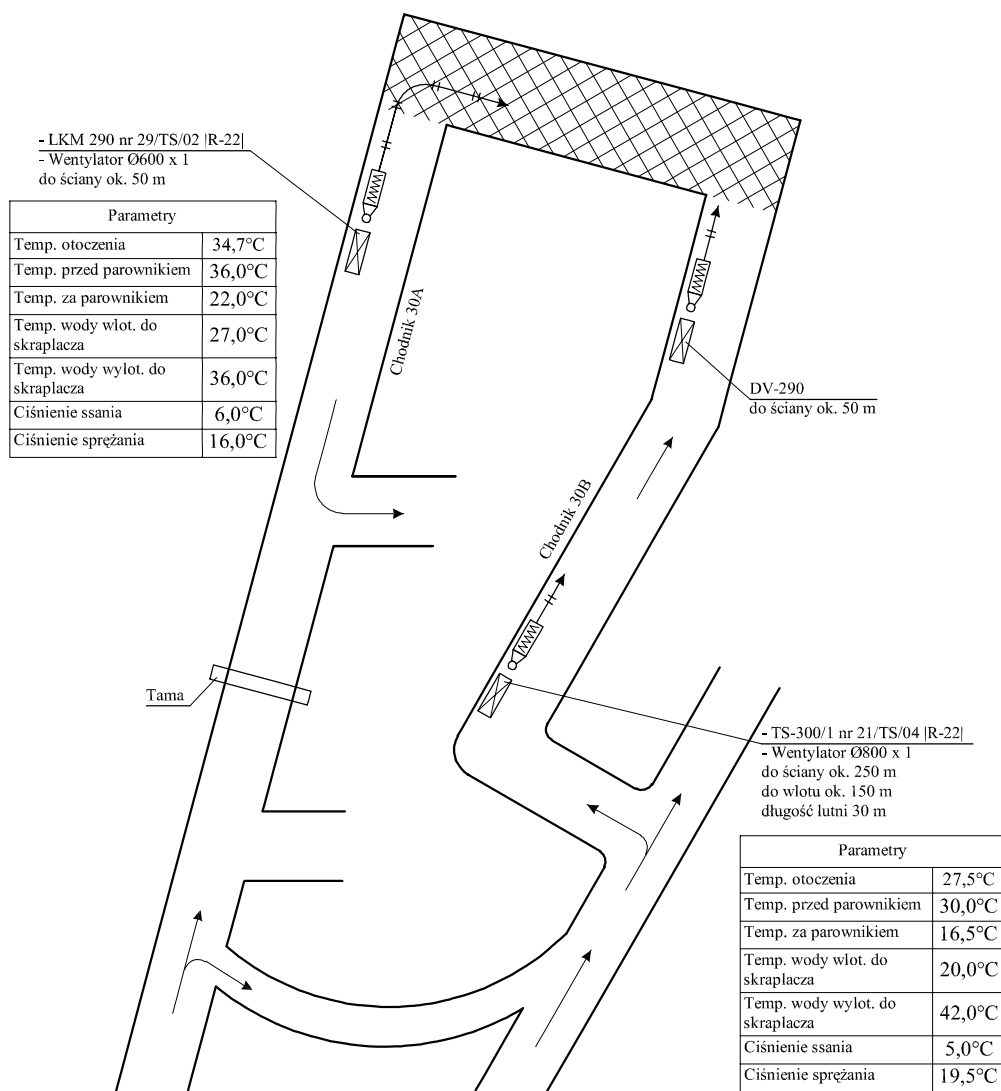
Rys. 9.12. Zastosowanie chłodziarek TS-300/1 i DV-290 do ochładzania powietrza w chodniku podścianowym H-49 w kopalni Makoszowy



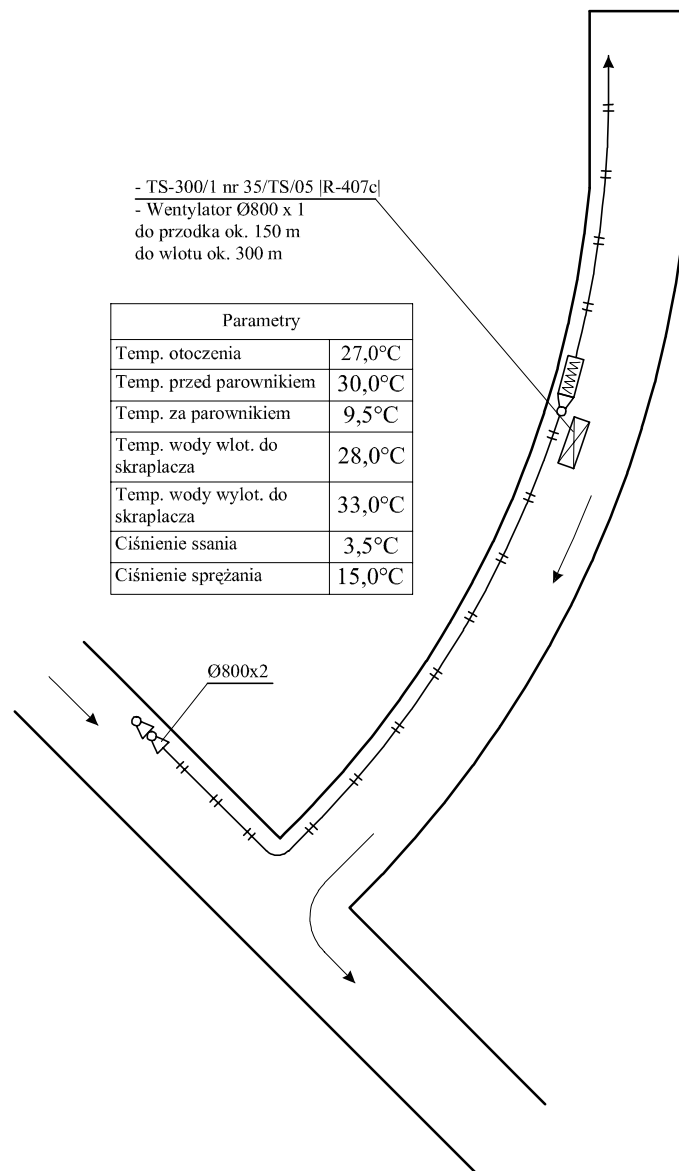
Rys. 9.13. Zastosowanie chłodziarki DV-290 do schładzania powietrza w chodniku H-46 w kopalni Makoszowy



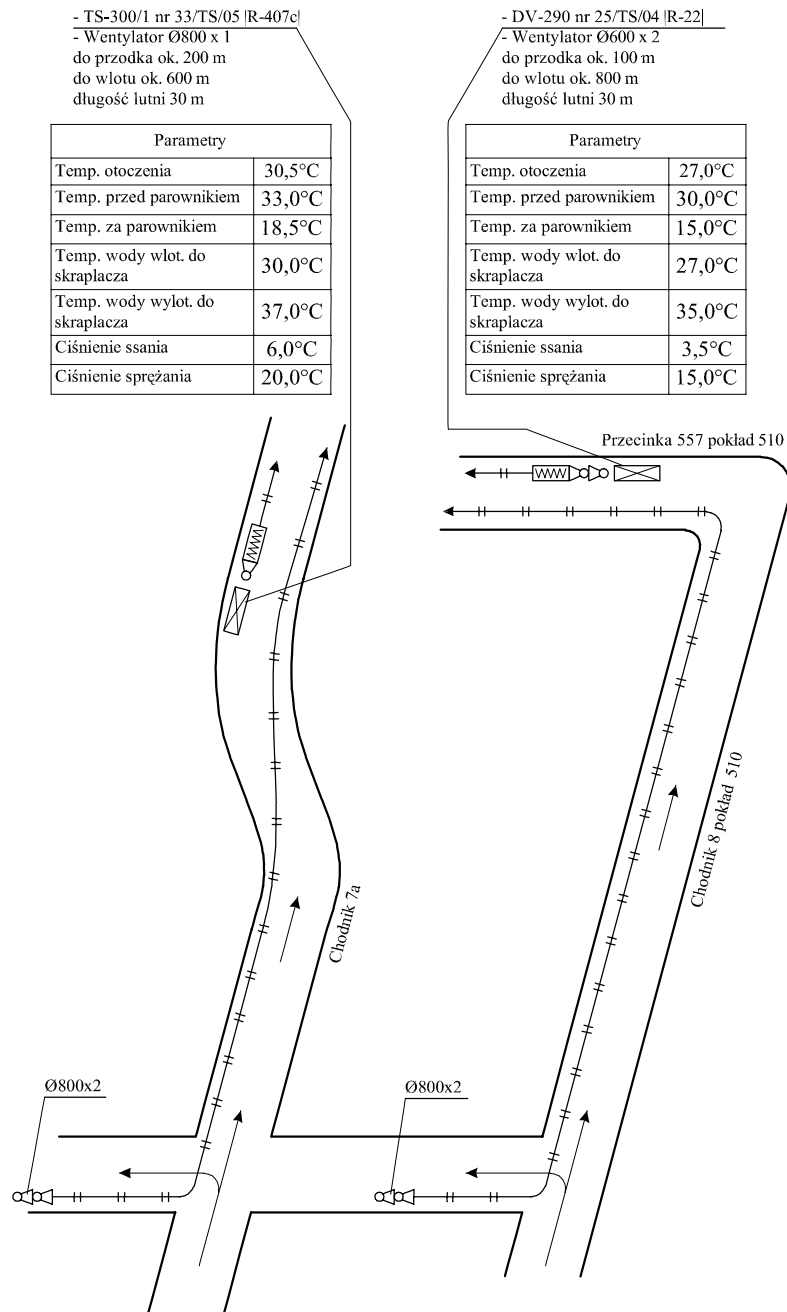
Rys. 9.14. Zastosowanie chłodziarki TS-300/1 do schładzania powietrza w chodniku podścianowym J-57 w kopalni Makoszowy



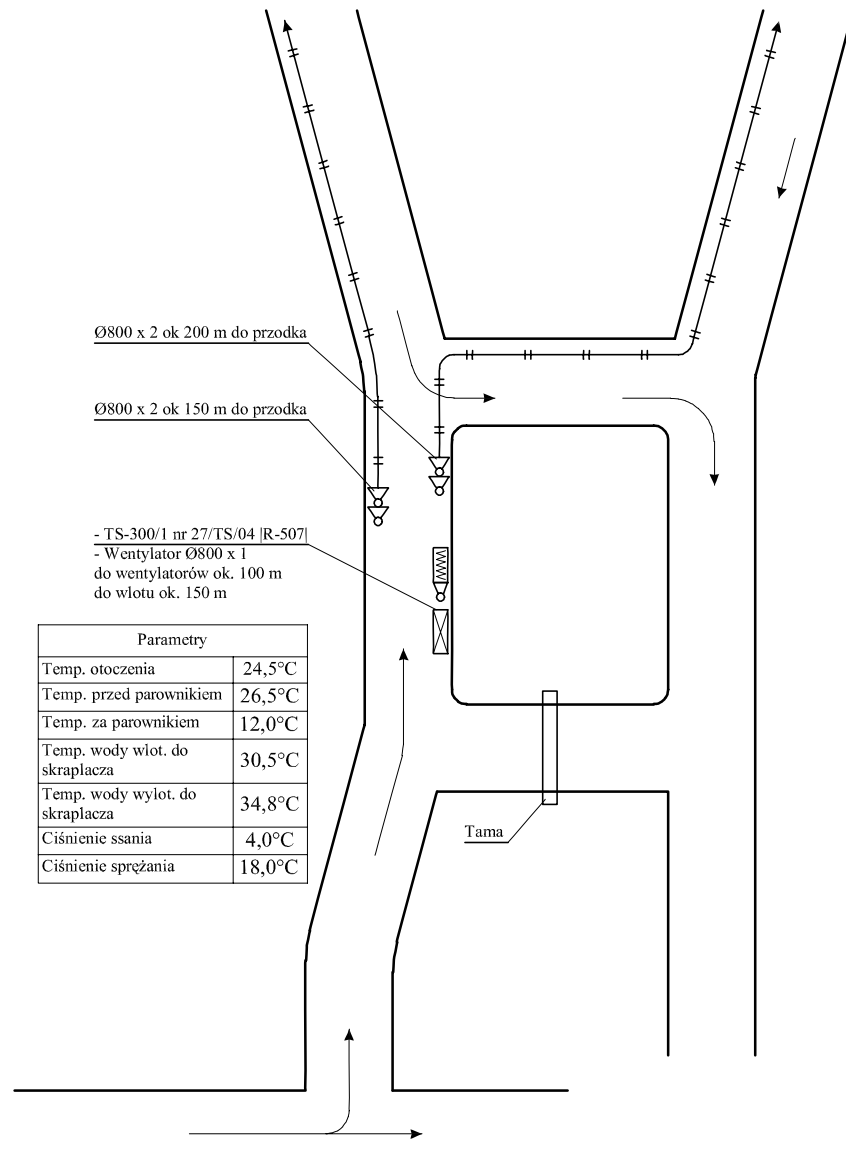
Rys. 9.15. Zastosowanie chłodziarek TS-300/1, DV-290 i LKM 290 do ochładzania powietrza w chodnikach 30A i 30B w kopalni Knurów



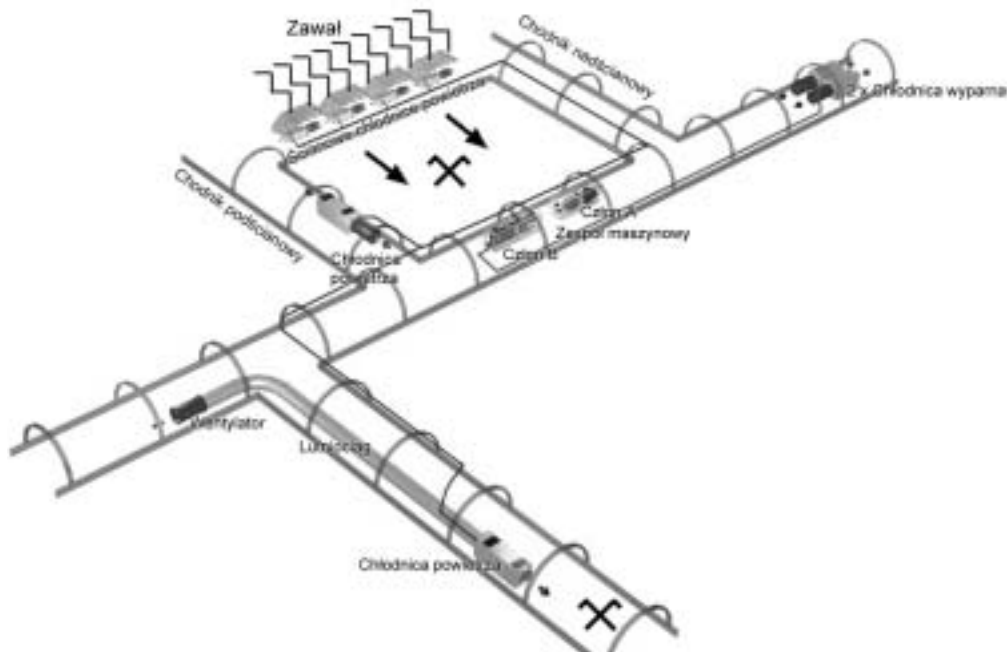
Rys. 9.16. Zastosowanie chłodziarki TS-300/1 do ochładzania powietrza w chodniku 6E1 w kopalni Rydułtowy



Rys. 9. 17. Zastosowanie chłodziarek DV-290 i TS-300/1 do ochładzania powietrza w przecince 557, pokład 510 i w chodniku 7a w kopalni Wesola



Rys. 9.18. Zastosowanie chłodziarki TS-300/1 do ochładzania powietrza w pochylni 829 w pokładzie 352 wschód w kopalni Brzeszcze

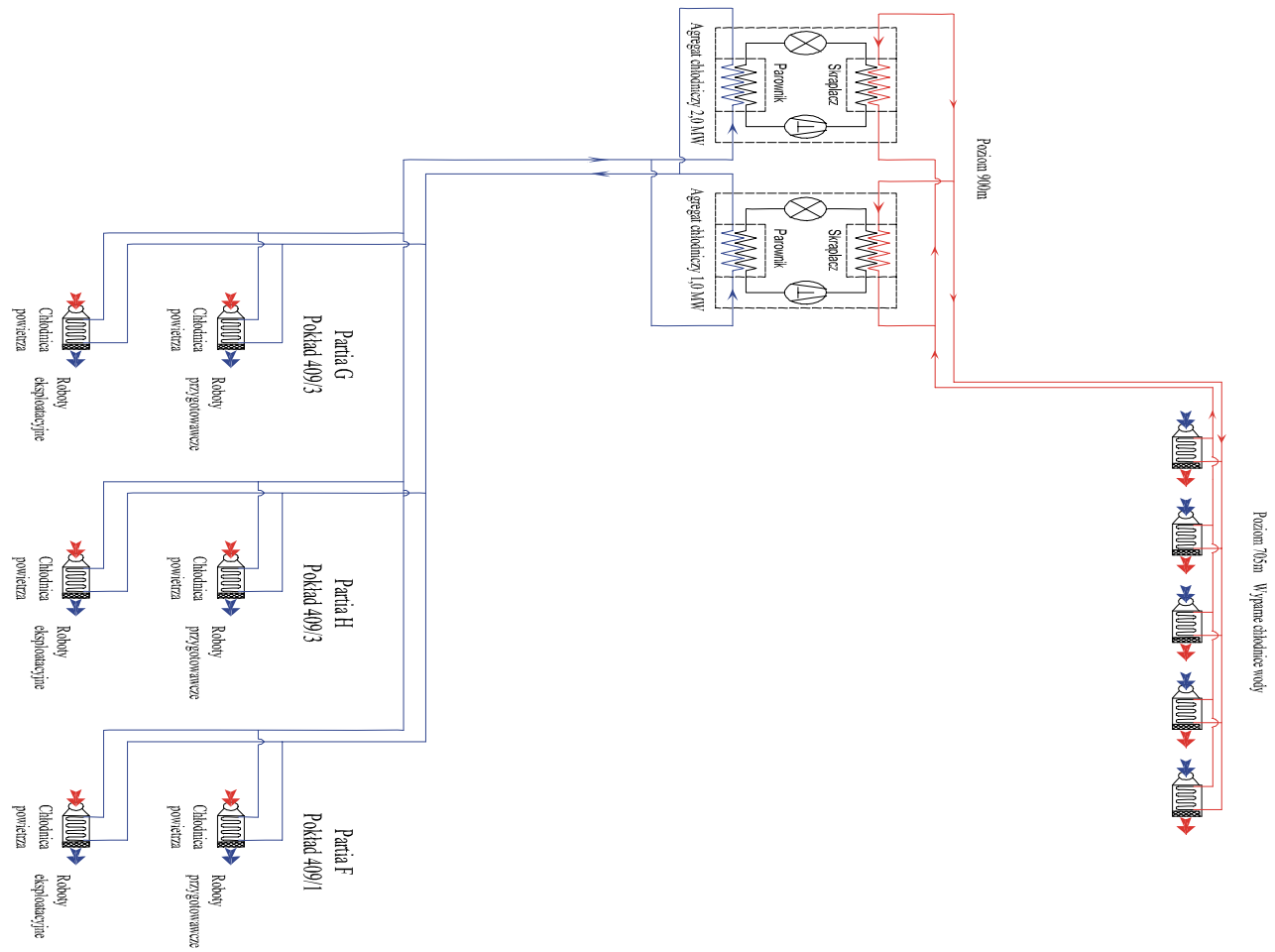


Rys. 9.19. Schemat kompleksowego chłodzenia rejonu eksploatacyjnego urządzeniem pośredniego działania

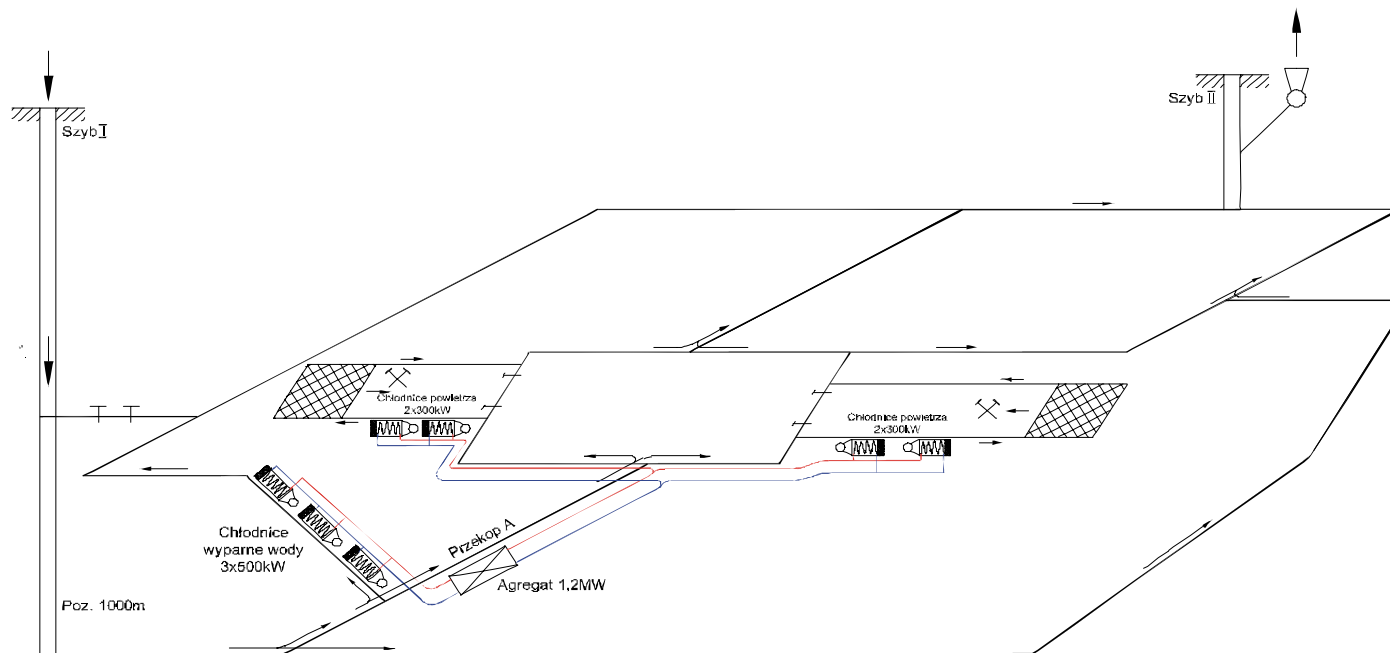
9.2. Klimatyzacja grupowa

W kopalni Zofiówka w 2004 r. uruchomiono w dwóch etapach klimatyzację grupową o łącznej mocy chłodniczej 3 MW do chłodzenia powietrza kopalnianego w grupie wyrobisk na poziomie 900 m (rys. 9.20) [20]. Komorę agregatów chłodzących wodę KM-2000 i KM-1000 zlokalizowano w przekopie południowym I wentylacyjnym na poziomie 900 m. Komorę wyparnych chłodnic powietrza zlokalizowano w wytycznej północnej równoległej i taśmowej przy szybie wentylacyjnym V na poziomie 705 m. Siecią izolowanych cieplnie rurociągów woda zimna jest dostarczana do przeponowych chłodnic powietrza rozmieszczonych w rejonach eksploatacyjnych.

W 2005 r. uruchomiono identyczny system klimatyzacji grupowej o mocy 3 MW w kopalni Borynia. Jest on przeznaczony do chłodzenia powietrza w grupie wyrobisk na poziomie 838 m.



Rys. 9.20. Schemat klimatyzacji szpuntiowej o mocy 3 MW w kopalni Zofiówka



Rys. 9.21. Schemat klimatyzacji oddziałowej z chłodziarką o mocy 1,2 MW

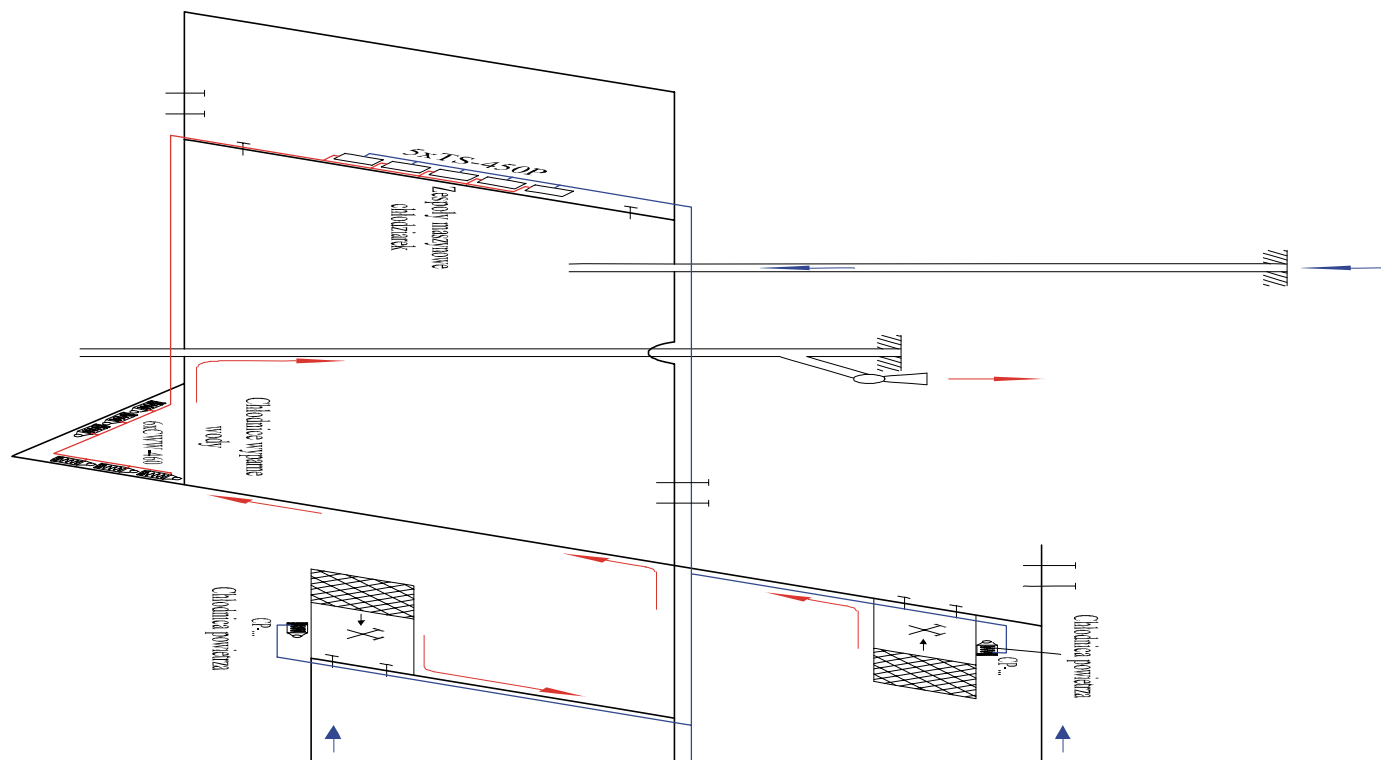
Agregaty chłodnicze o mocy chłodniczej od 1 do 2 MW (rys. 9.21) mogą być stosowane jako pojedyncze lub łączone w zespoły [20]. Ciepło ze skraplacza agregatów chłodniczych jest zazwyczaj doprowadzane do chłodnic wyparnych zlokalizowanych w wyrobiskach przyszybowych odprowadzających zużyte powietrze z wyrobisk górniczych. Podstawową zaletą systemów klimatyzacji grupowej jest możliwość realizacji wielu wariantów rozmieszczeń chłodnic powietrza.

Agregaty o małej mocy chłodniczej do 450 kW mogą być łączone w układy równoległe (zespoły) i rozbudowywane w miarę potrzeb (rys. 9.22 i 9.23). Zespoły takie umożliwiają regulowanie mocy chłodniczej w określonym rejonie kopalni przez uruchomienie lub wyłączenie agregatów chłodniczych i pozwalają uzyskiwać wysoką efektywność ekonomiczną chłodzenia powietrza kopalnianego.

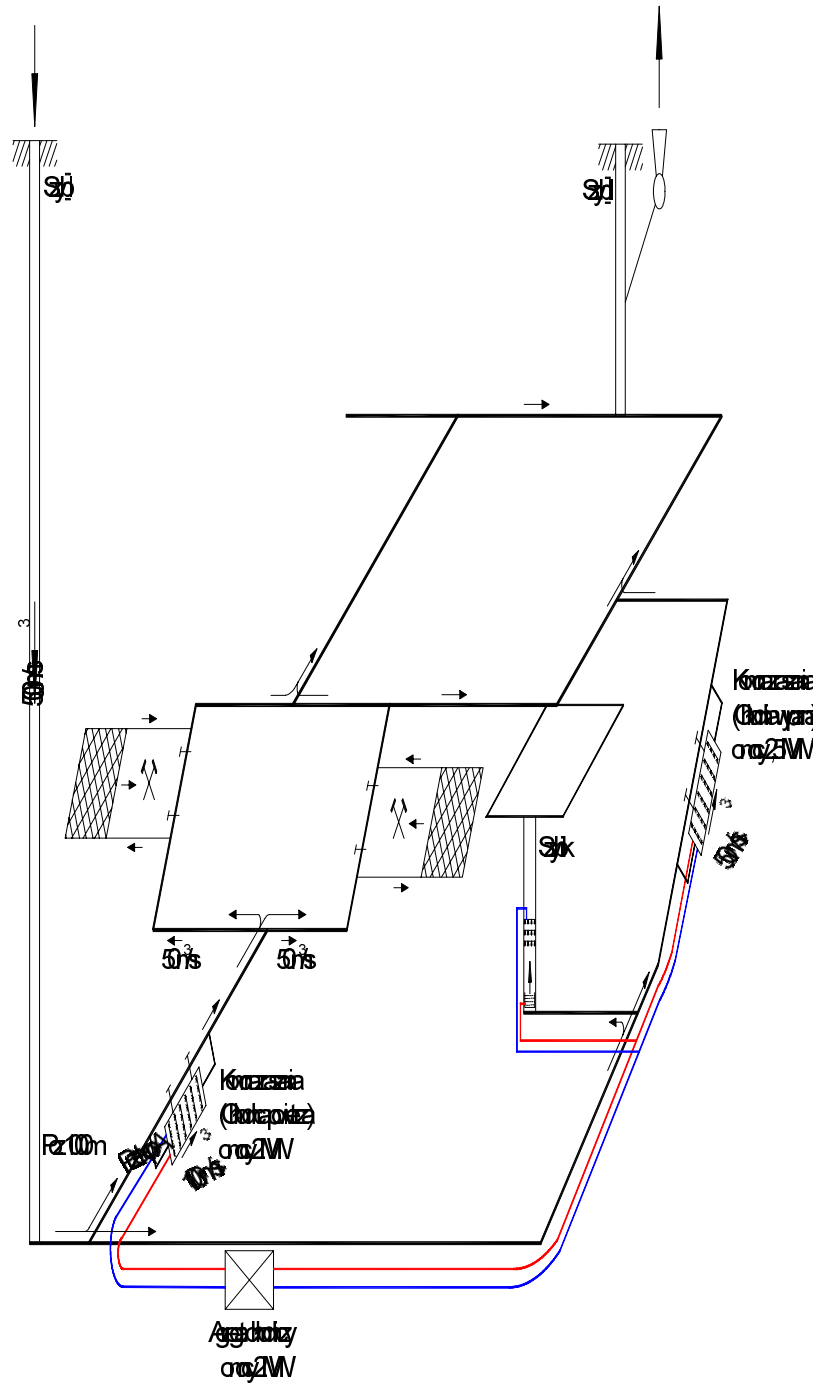


Rys. 9.22. Komora agregatów chłodniczych

Aby uzyskać duże wydajności chłodnicze, można stosować komory zraszania oraz chłodnice kombinowane. W chłodnicach kombinowanych pierwszy etap chłodzenia i osuszania powietrza odbywa się drogą kontaktu z rozpyloną wodą, a drugi w wodnej przeponowej chłodnicy powietrza. Chłodnice przeponowe i kombinowane są na ogół przenośne, komory zraszania natomiast o mocy chłodniczej od 800 do 2000 kW buduje się jako stacjonarne. Zastosowanie komór zraszania do schładzania powietrza w wyrobiskach ścianowych ilustruje rys. 9.24.



Rys. 9.23. Schemat klimatyzacji grupowej 5xTS-450P o mocy 2,1 MW

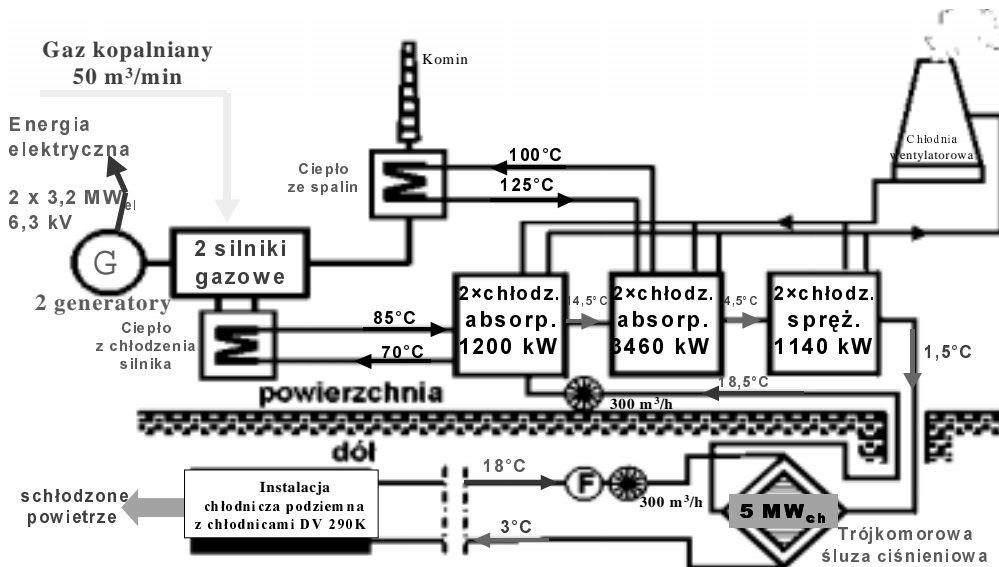


Rys. 9.24. Schemat klimatyzacji oddziałowej z komorami zraszania

9.3. Centralna klimatyzacja w kopalni Pniówek

W kopalni węgla kamiennego Pniówek eksploatacja pokładów węglowych jest prowadzona na głębokościach około 830–1000 m, przy dużym zagrożeniu metanowym i temperaturowym. Metanowość bezwzględna wynosi około $240 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{min}$, przy czym około 41% metanu ujmowane jest do sieci odmetanowania.

W wyniku szczegółowych analiz techniczno-ekonomicznych różnych systemów klimatyzacyjnych podziemnych wyrobisk górniczych przyjęto jako najlepsze rozwiązanie dla kopalni Pniówek system centralnej klimatyzacji bazujący na układzie skojarzonym energetyczno-chłodniczym składającym się z silników gazowych wraz z generatorami energii elektrycznej oraz maszyn chłodniczych absorpcyjnych i sprężarkowych (rys. 9.25).



Rys. 9.25. Schemat skojarzonego układu energetyczno-chłodniczego w kopalni Pniówek

Zapotrzebowanie mocy chłodniczej wynosi 5 MW dla poziomu 830 m i 10 MW dla perspektywicznej eksploatacji na poziomie 1000 m. W układzie skojarzonym energetyczno-chłodniczym uruchomionym w 2000 r. mieszanka metanu o koncentracji 50–60% i wydatku około $50 \text{ m}^3/\text{min}$ pochodząca z sieci odmetanowania kopalni służy jako paliwo do zasilania dwóch czterosurowych silników gazowych TBG 632 V 16 o prędkości obrotowej 1000 obr/min. Silniki te napędzają dwa generatory elektryczne każdy o mocy 3,2 MW. Ciepło wytwarzane w tym procesie jest wykorzystywane do przemiany w chłodniarkach absorpcyjnych, które ochładzają wodę do temperatury około 4,5–7,0 °C. Przez chłodziarkę sprężarkową woda ta ochłodzona

do temperatury 1,5–2,5 °C jest sprowadzana izolowanym rurociągiem średnicy 300 mm na poziom 820 m do trójkomorowej śluzy ciśnieniowej Siemag (trójkomorowy podajnik wody). Woda powrotna natomiast z poziomu 830 m na powierzchnię do agregatu chłodniczego jest transportowana nieizolowanym rurociągiem średnicy 300 mm. Trójkomorowa śluza ciśnieniowa Siemag służy do transportu wody i redukcji ciśnienia między rurociągami szybowymi na poziomie 830 m [18, 55]. Do ochładzania powietrza w kopalni Pniówek stosuje się przeponowe wodne chłodnice powietrza o mocach od 200 do 300 kW [56].

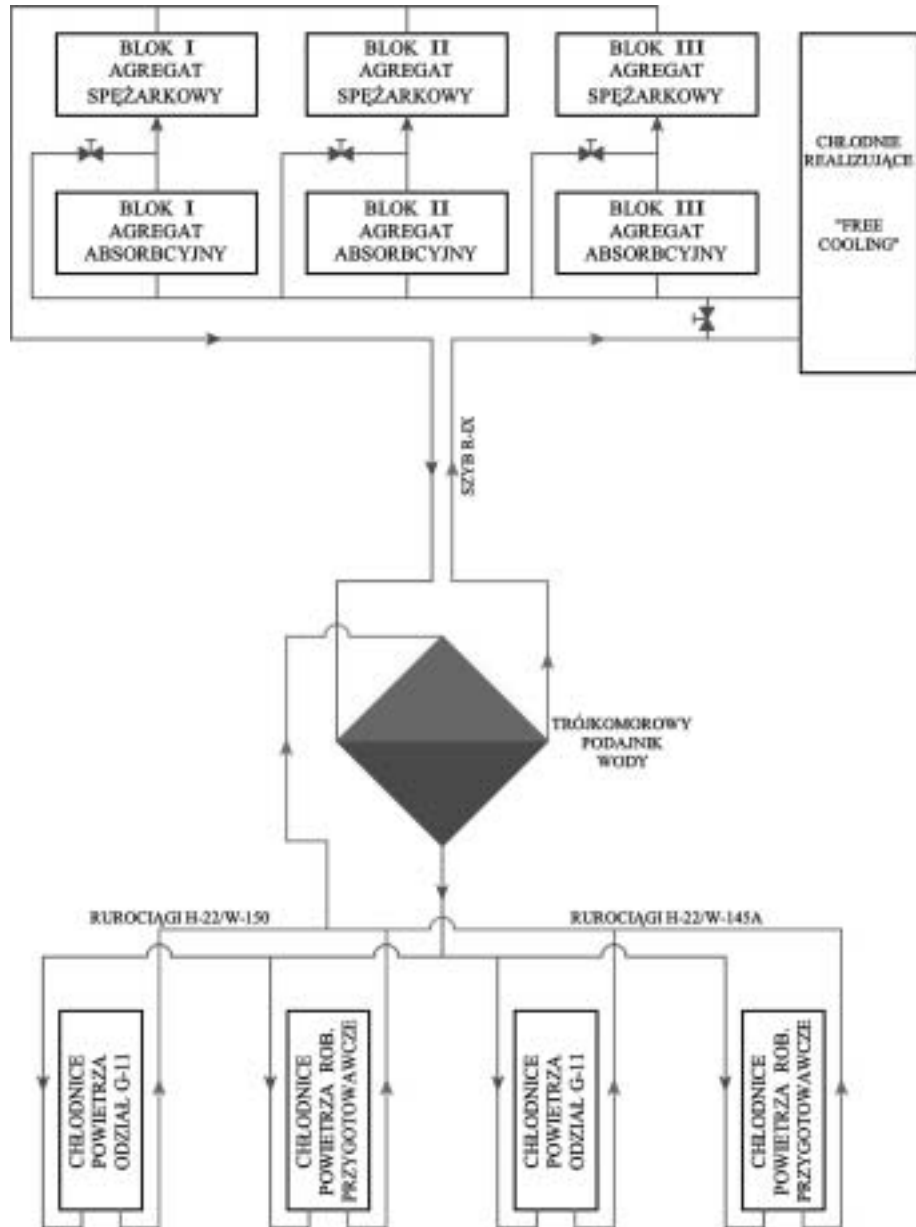
9.4. Centralna klimatyzacja w O/ZG Rudna

W kopalni rudy miedzi Rudna stosowana jest klimatyzacja centralna z powierzchniowymi urządzeniami chłodniczymi [37, 41]. Urządzeniami chłodniczymi w tej stacji klimatyzacyjnej są chłodziarki absorpcyjne i sprężarkowe. Moc chłodnicza stacji, wynosząca 15 MW, zapewnia schładzanie 700 m³/h wody o temperaturze 22 °C (wody powracającej z podziemia kopalni) do temperatury 1,5 °C, która jest wykorzystywana jako medium chłodnicze do ochładzania powietrza w miejscach prowadzenia podziemnych robót górniczych.

Urządzenie klimatyzacyjne kopalni Rudna obejmuje:

- stację powierzchniową służącą do ochładzania wody obiegowej,
- trójkomorowy podajnik wody (wymyennik ciepła Siemag),
- rurociągi szybowe łączące trójkomorowy podajnik wody ze stacją klimatyzacyjną,
- sieć rurociągów dołowych zasilających i odprowadzających wodę z chłodnic powietrza,
- chłodnice powietrza w klimatyzowanych wyrobiskach górniczych.

Trójkomorowy podajnik wody jest zabudowany na podszybiu szybu R-IX. Do tego podajnika siecią rurociągów doprowadzana jest ciepła woda powracająca z chłodnic powietrza zlokalizowanych w określonych rejonach kopalni. Nieizolowanym rurociągiem zabudowanym w szybie R-IX woda ciepła jest kierowana do powierzchniowej stacji klimatyzacyjnej. Stąd woda przez układ filtrujący jest przepompowywana do czterech równoległych chłodnic wyparnej wody, które są wykorzystywane w temperaturze zewnętrznej powietrza niższej od 16 °C lub automatycznie sterowanym obciążeniem do trzech włączonych równolegle maszyn chłodniczych absorpcyjnych i drugich stopni maszyn chłodniczych sprężarkowych. Gdy temperatura wody powrotnej z kopalni wynosi 22 °C, na pierwszym stopniu zostaje ochłodzona do temperatury 12,9 °C, a następnie woda przepływa na drugi stopień chłodzenia do agregatów sprężarkowych, gdzie zostaje dochłodzona do 1,5 °C (rys. 9.26).



Rys. 9.26. Schemat ideowy centralnej klimatyzacji w O/ZG Rudna

9.5. Klimatyzacja stanowiskowa w kopalniach rud miedzi

W celu poprawy warunków pracy w kopalniach rud miedzi w KGHM coraz powszechniejsze zastosowanie znajdują agregaty chłodnicze do klimatyzacji stanowiskowej [8, 41]. Są to małe urządzenia chłodnicze o mocy chłodniczej 3,5 kW. Agregaty te są stosowane na stacjonarnych stanowiskach pracy, takich jak: operator urządzeń do rozbijania brył skalnych, operator napędów przenośników taśmowych lub osób nadzorujących pracę instalacji i urządzeń dołowych. Wspomniane urządzenia klimatyzacyjne są także stosowane na stanowiskach operatorów samojezdnych maszyn górniczych o napędzie spalinowym, takich jak: ładowarki, wozy wierzące, wozy kotwiące, wozy do obrywki skał, samojezdne wozy strzelnicze i inne.

Stosuje się różne typy agregatów chłodniczych, jak np. [8]:

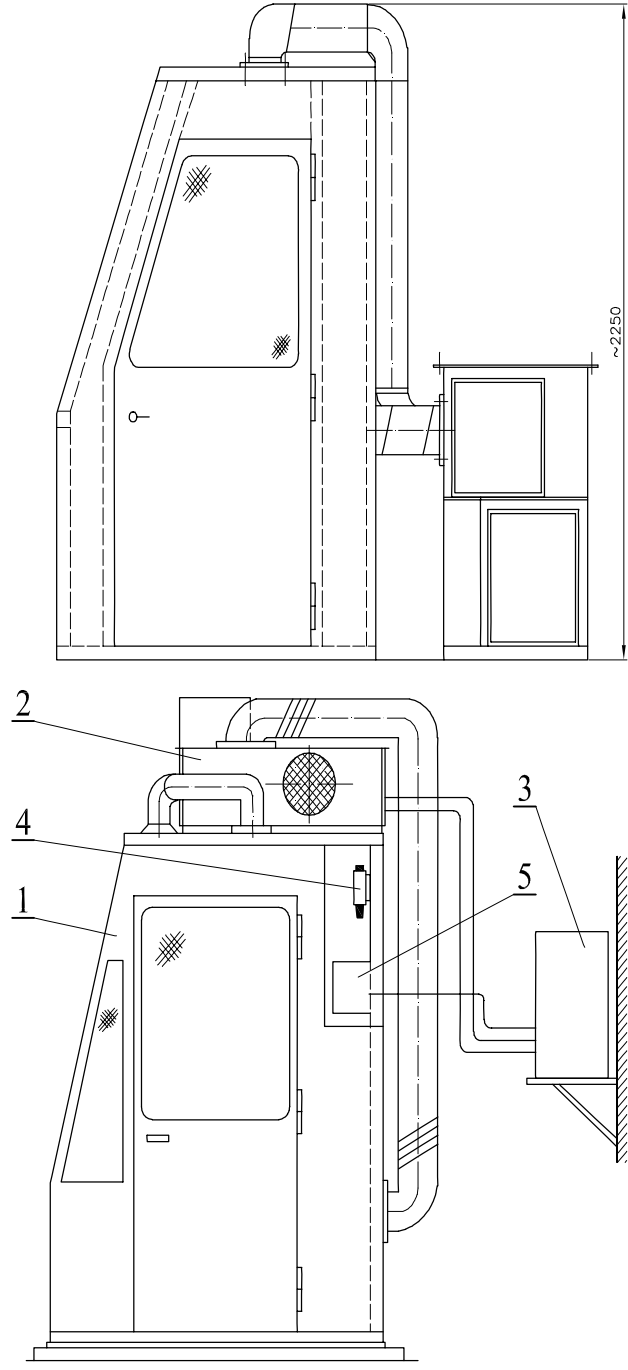
- urządzenia klimatyzacyjne typu UKK-1 do chłodzenia powietrza nawiewnego otwartego stanowiska samojezdnego wozu kotwiącego,
- urządzenia klimatyzacyjne UKW-1 i UKM-1 ochładzające powietrze nawiewane do zamkniętych kabin operatorów samojezdnych wozów wierzących, samojezdnych wozów kotwiących i ładowarek kopalnianych,
- kabiny klimatyzowane z urządzeniami typu UKR-3 i UKR-3b na stanowisku operatorów napędów przenośników taśmowych i stanowisku operatorów urządzeń do rozbijania brył skalnych.

Na rysunku 9.27 przedstawiono samojezdną maszynę wierzącą z agregatem klimatyzacyjnym UKW-1, natomiast na rysunkach 9.28 i 9.29 przedstawiono sposoby zabudowy urządzeń klimatyzacyjnych UKR-3 i UKR-3b.

Stanowiskowe stacjonarne kabiny z agregatami chłodniczymi umożliwiają obniżenie temperatury powietrza o około 4–8 °C. Średnie natomiast obniżenie temperatury w kabinach maszyn samojezdnych wynosi od 3 °C do 7 °C nawet wówczas, gdy silnik spalinowy maszyny jest wyłączony, a maszyna jest podłączona do kopalnianej sieci elektrycznej 500 V. Należy podkreślić, że obecnie w kopalniach rud miedzi w LGOM-ie pracuje około 100 klimatyzacyjnych agregatów stanowiskowych.



Rys. 9.27. Urządzenie klimatyzacyjne w wozie wierzącym SWW



Rys. 9.28. Urządzenie klimatyzacyjne kabiny operatora

Rys. 9.29. Kabina klimatyzowana na stanowisku operatora urządzenia stacjonarnego: 1 – kabina operatora, 2 – urządzenie klimatyzacyjne, 3 – elektryczne urządzenie zasilające, 4 – czujnik temperatury, 5 – skrzynka sterownicza

10. Stacja prób górniczych chłodziarek powietrza kopalnianego

W celu poprawy trudnych warunków klimatycznych w wielu kopalniach w coraz szerszym zakresie stosuje się górnicze chłodziarki powietrza kopalnianego. Urządzenia te, zwłaszcza w warunkach zagrożenia metanowego, pyłowego oraz wodami agresywnymi muszą spełniać wysokie standardy. Dlatego też każda nowa chłodziarka powietrza kopalnianego lub po kapitalnym remoncie musi przejść szczegółowe badania techniczne pod nadzorem jednostki atestacyjnej w celu dopuszczenia jej do ruchu w wyrobiskach podziemnego zakładu górniczego. W tym celu w 2000 r. firma Termospec sp. z o.o. w Żorach wybudowała stację prób chłodziarek powietrza kopalnianego bezpośredniego i pośredniego działania [6, 21].

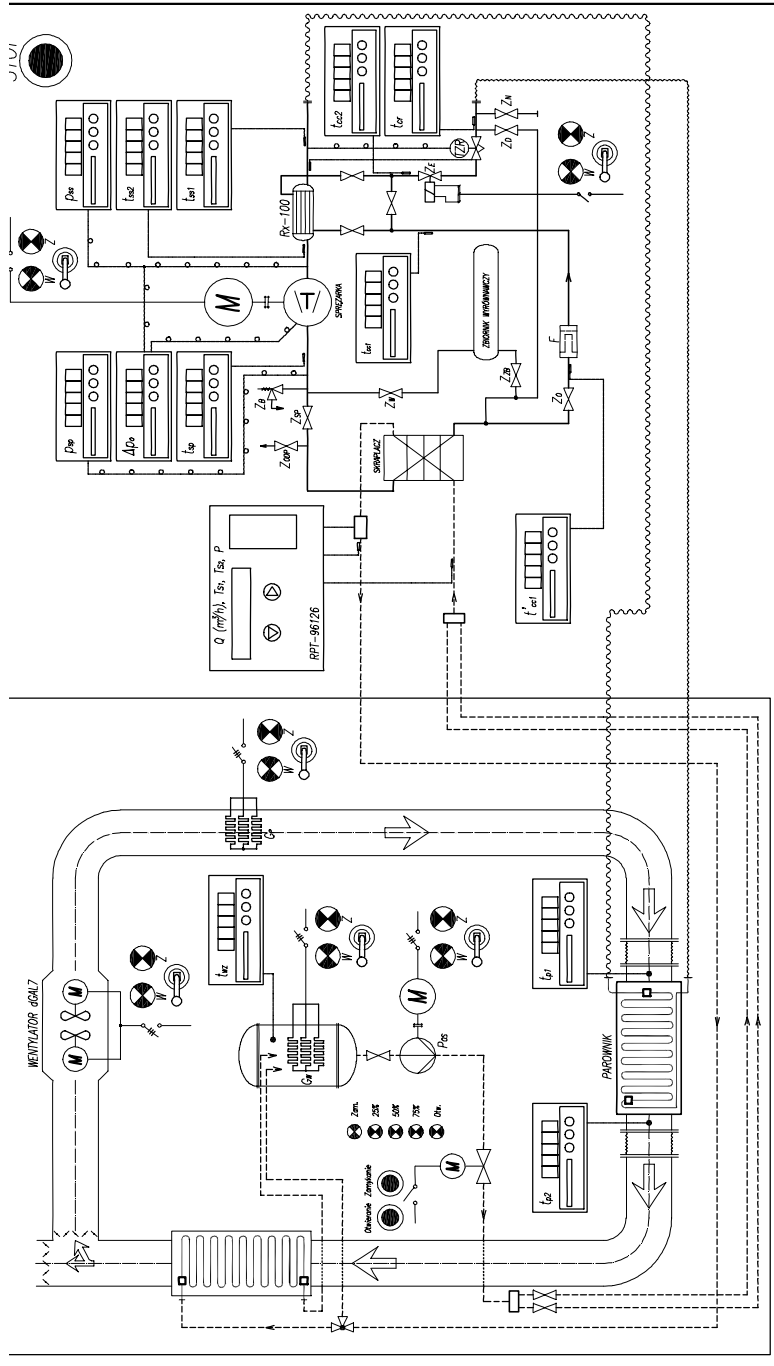
Stacja ta została zbudowana w celu:

- wykonywania prób i badań technicznych nowo zaprojektowanych i dopuszczonych do stosowania chłodziarek powietrza kopalnianego,
- wykonywania badań wydajności chłodniczej i sprawności obiegu termodynamicznego w nowo zaprojektowanych chłodziarkach z zastosowaniem różnych czynników chłodniczych,
- sprawdzania poprawności technicznej działania wyremontowanych chłodziarek.

W wymienionych badaniach sprawdza się m.in. osiągnięte parametry przez chłodziarkę w warunkach zbliżonych do panujących w podziemiach kopalń, bada się szczelność obiegu termodynamicznego i wodnego oraz poziom hałasu generowanego w czasie pracy chłodziarki.

10.1. Charakterystyka stacji prób

Stacja prób chłodziarek powietrza kopalnianego jest zbudowana w hali warsztatowej Termospec sp. z o.o. w Żorach. Stacja ta jest przystosowana do badania chłodziarek powietrza bezpośredniego działania typów DV, LKM produkcji niemieckiej firmy GFW i Wende&Malter oraz chłodziarek bezpośredniego i pośredniego działania typu TS produkowanych przez Termospec.



Rys. 10.1. Stacja prób chłodziarek bezpośredniego działania

Stacja może być wykorzystywana do prób i badań innego typu chłodziarek bezpośredniego (rys. 10.1) lub pośredniego (rys. 10.2) działania.

Stacja jest tak zaprojektowana, że umożliwia przeprowadzenie badań chłodziarek powietrza w warunkach zbliżonych do warunków występujących w podziemnych wyrobiskach górniczych.

Stacja jest wyposażona w następujące maszyny i urządzenia:

- lutniociąg o średnicy znamionowej 800 mm,
- wentylator wymuszający przepływ powietrza w obiegu zamkniętym,
- chłodnicę wody,
- zbiornik wody bezciśnieniowy do chłodzenia skraplacza badanego urządzenia chłodniczego,
- pompę obiegu chłodzenia skraplacza,
- pompę obiegu zraszania węzownic chłodnicy wyparnej wody.

Rozdzielnia o napięciu znamionowym 500 V zasilają silniki napędowe wentylatora i pompy oraz grzałki do podgrzewania wody w zbiorniku, a także do podgrzewania powietrza w obiegu.

Silniki elektryczne i grzałki zasilane są przewodami oponowymi ekranowanymi o przekroju żył dobranym do występujących obciążeń.

Zasilanie wszystkich urządzeń w stacji prób odbywa się z rozdzielni okapturzonej 500 V z hali produkcyjno-remontowej Termospec za pomocą przekaźników sterowanych z pulpitu pomiarowo-sterowniczego.

Pulpit pomiarowo-sterowniczy jest zasilany z transformatora umieszczonego w szafie rozdzielczej okapturzonej, prądem o napięciu znamionowym 24 V. Urządzenia pomiarowe i komputer zasilane są prądem o napięciu znamionowym 220 V.

10.2. Działanie stacji prób

Stacja prób w połączeniu z badaną chłodziarką powietrza stanowi układ chłodniczy, w którym wyróżnia się następujące obiegi:

- obieg czynnika chłodniczego w zespole maszynowym i parowniku,
- obieg wody chłodzącej skraplacz,
- obieg powietrza.

Obieg czynnika chłodniczego przebiega w badanym zespole maszynowym i parowniku. Parametry pracy niezbędne do badania i kontroli poszczególnych elementów zespołu maszynowego są mierzone za pomocą czujników w miejscach pokazanych na schemacie i wyświetlane na pulpicie stacji prób (rys. 10.1 i 10.2).

Wszystkie mierniki cyfrowe umożliwiają rejestrację pomiarów na dysku komputera. Z pulpitu sterowniczego można włączać silnik napędowy sprężarki oraz zamykać

i otwierać zawór elektromagnetyczny. Dodatkowo istnieje możliwość pomiaru mocy elektrycznej zużywanej przez silnik napędowy sprężarki.

W skład obiegu wody chłodzącej skraplacz wchodzi następujące zasadnicze elementy:

- chłodnica wyparna wody,
- zbiorniki wody ciepłej i zimnej lub zbiornik wody ciepłej z grzałką elektryczną,
- zasuwy regulacyjne,
- elastyczne węże freonowe,
- węże elastyczne wody chłodzącej skraplacz i parownik,
- pompy obiegowe typu OS-80 firmy STALKON POWEN,
- zawory trójdrogowe.

Woda chłodząca po pobraniu ciepła w skraplaczu od gorącego czynnika chłodniczego zostaje schłodzona w chłodnicy wyparnej wody, gdzie oddaje ciepło powietrzu. Za chłodnicą wyparną woda kierowana jest do zbiornika wody chłodzącej. Zawór trójdrogowy zabudowany na rurociągu powrotnym wody umożliwia skierowanie częściowo lub w całości ogrzanej wody bezpośrednio do zbiornika. Zbiornik ma wbudowaną grzałkę elektryczną do podgrzewania wody. Woda o temperaturze odpowiadającej normalnym warunkom eksploatacyjnym chłodziarki jest tłoczona przez pompę obiegową z powrotem do skraplacza. Do precyzyjnej regulacji wydatku wody zasilającej skraplacz służy zasowa z serwomechanizmem zabudowana na kolektorze tłocznym pompy. Obieg wyposażono w termometr do pomiaru temperatury wody w zbiorniku.

W skład obiegu powietrza wchodzi następujące elementy:

- wentylator typu dGAL7 firmy Korfmann,
- elektryczna grzałka powietrza,
- zespół lutni o średnicy 800 mm,
- elastyczne króćce przyłączone parownika lub chłodnicy powietrza do lutni,
- chłodnica wyparna wody,
- przepustnica powietrza.

Powietrze ochłodzone w parowniku lub w chłodnicy powietrza dostaje się przez lutniociąg o średnicy 800 mm do chłodnicy wyparnej wody, gdzie pobiera ciepło od wody chłodzącej skraplacz. Podgrzane powietrze może być wyrzucane na zewnątrz układu bądź może być kierowane z powrotem do obiegu powietrza za pomocą przepustnicy. Odpowiedni wydatek powietrza w obiegu zapewnia wentylator typu dGAL7 zamontowany przed parownikiem lub chłodnicą powietrza. Obieg wyposażono w termometry do pomiaru temperatury powietrza przed i za parownikiem (chłodnicą powietrza).

10.3. Wyposażenie stacji prób

Obieg powietrza wymuszony jest wentylatorem osiowym dwustopniowym typu dGAL7-350/350 produkcji niemieckiej firmy Korfmann GmbH, o mocy znamionowej silników 35 kW, napięciu zasilania 500 V, wydajności znamionowej $\dot{V} = 600 \text{ m}^3/\text{min}$ i ciśnieniu równemu 4600 Pa.

W obiegu zasilania skraplaczy badanych na stacji prób agregatów chłodniczych zastosowane są dwa zbiorniki wody o pojemności znamionowej 1000 dm^3 każdy, znamionowym ciśnieniu roboczym 16 bar, zakresie temperatury pracy $2\div 100 \text{ }^\circ\text{C}$.

Zbiorniki wykonane są w kształcie walczaka o średnicy zewnętrznej 1030 mm, obustronnie zakończonych dennicami elipsoidalnymi. Grubość ścianki zbiornika wynosi 10 mm.

Do bocznych ścianek w górnej części walcowej zbiornika wspawane są dwa króćce o średnicy 30 mm zakończone kołnierzami. W dolnej części walcowej zbiornika wspawany jest króciec odpływowy o średnicy 100 mm zakończony kołnierzem.

Na górnej dennicy elipsoidalnej zamontowany jest króciec dopływowy wody, a do dolnej pokrywy wspawany jest króciec $88,9 \times 4,5 \text{ mm}$ z kołnierzem o średnicy 200 mm. Króciec ten jest przewidziany do usuwania osadów i ewentualnego czyszczenia zbiornika.

Do bocznej ścianki walczaka wspawany jest włącz o średnicy wewnętrznej 410 mm z klapą rewizyjną.

Do bocznych ścianek w dolnej części zbiornika przyspawane są trzy nogi, na których posadowiony jest zbiornik. Nogi wykonane są z ceownika C120 i zakończone płytami z blachy o grubości 10 mm.

Całkowita wysokość zbiornika (z nogami) wynosi 1800 mm.

Zbiornik oprócz funkcji gromadzenia zapasu wody do obiegu chłodzenia skraplacza pełni funkcję podgrzewacza wody i jest wyposażony w zespół grzałek elektrycznych o mocy około 6 kW zasilanych trójfazowym napięciem $3 \times 230 \text{ V}$.

Podgrzewanie wody w zbiorniku jest niezbędne do ogrzania powietrza w obiegu do temperatury umożliwiającej rozruch badanego agregatu. Przekazanie ciepła ze zbiornika do powietrza odbywa się pośrednio w chłodnicy, w której podczas pracy agregatu następuje schładzanie wody podgrzanej w skraplaczu.

Zespół grzałek zamontowany jest do kłapy rewizyjnej umieszczonej na bocznej ścianie walczaka.

Dodatkowe wyposażenie zbiornika stanowi czujnik temperatury wody oraz poziomomierz.

W zamkniętym obiegu powietrza w zespole lutni 800 mm na stacji prób następuje powolne schładzanie powietrza i podnoszenie się temperatury w zbiorniku wody chłodzącej skraplacza.

Podczas prób jako chłodnicę wody można wykorzystać chłodnicę stacjonarną (jeżeli chłodziarka przeznaczona jest do pracy z otwartym obiegiem chłodzenia) lub

chłodnicę wyparną wody, będącą podzespołem chłodziarki przeznaczonej do pracy z zamkniętym obiegiem chłodzenia skraplacza.

Chłodnica stacjonarna ma takie same parametry jak chłodnica wyparna wody typu CWW stosowana w chłodziarkach powietrza typu TS-300/1 i TS-350/1 i chłodnica RK-450 przeznaczona dla chłodziarek powietrza typu DV-290 oraz RKH-105-RV stosowana w chłodziarkach powietrza typu LKM 290.

Chłodnica wyparna stanowi wymiennik ciepła pomiędzy wodą chłodzącą skraplacz i strumieniem powietrza wymuszonym przez wentylator oraz strumieniami wody zraszającej węzownice chłodnicy. Rury tego wymiennika (węzownice) od strony zewnętrznej są zraszane wodą, krążącą w zamkniętym obiegu wody wyparnej chłodnicy powietrza. Woda odparowana w tym obiegu zamkniętym uzupełniana jest świeżą wodą.

Od strony wylotu powietrza zabudowane są odkraplacze wody z łopatkami wykonanymi z tworzywa sztucznego PCV pomalowanego farbą antystatyczną lub z blachy stalowej ocynkowanej o grubości od 1 do 2 mm.

Aby precyzyjnie zobrazować parametry pracy chłodziarek badanych na stacji prób, poszczególne punkty pomiarowe są oczujnikowane. W zależności od rodzaju mierzonego parametru są zastosowane trzy grupy czujników:

- temperatury,
- ciśnienia,
- przepływu.

Jako czujniki temperatury stosuje się rezystory platynowe typu PT-100, PT-500 lub PT-1000, współpracujące z przetwornikami (sygnałów analogowych proporcjonalnych do mierzonej temperatury) na sygnały standardowe napięciowe lub prądowe albo z przetwornikami A/C i wyposażonymi w wyświetlacze cyfrowe umożliwiające odczyty ze stanowiska pulpitu sterowniczego.

Czujniki ciśnienia stanowią przetworniki siły proporcjonalnej do wartości mierzonego ciśnienia na sygnał analogowy albo cyfrowy. Sygnał ten jest kierowany z przetwornika do wyświetlacza cyfrowego na pulpicie.

Do pomiaru przepływu wody chłodzącej skraplacz na stacji jest zastosowany czujnik ultradźwiękowy wyposażony dodatkowo w dwa czujniki temperatury i przelicznik mikroprocesorowy z wyświetlaczem cyfrowym, dzięki czemu można mierzyć i kontrolować w sposób ciągły przepływ wody, temperaturę na wlocie i wylocie wody ze skraplacza oraz moc cieplną pobieraną przez skraplacz.

Wszystkie czujniki temperatury, ciśnienia i różnicy ciśnień oraz temperatury są wyposażone w dodatkowe wyjścia analogowe lub cyfrowe przewidziane do współpracy z komputerem, który może być zabudowany na pulpicie sterowniczym.

Stacja prób ma pulpit pomiarowo-sterowniczy. Na blacie pulpitu przedstawiono w sposób schematyczny cały układ chłodziarki powietrza z wszystkimi urządzeniami pomocniczymi i pomiarowymi. Z pulpitu można zdalnie załączać i wyłączać wszystkie urządzenia stacji prób i badanej chłodziarki oraz za pomocą kolorowych lampek

obserwować stan ich pracy. Wszystkie niezbędne parametry pracy podzespołów chłodziarki zobrazowano w sposób zblokowany na pulpicie stacji prób. Parametry te po przetworzeniu na sygnały elektryczne w czujnikach pomiarowych przesyłane są do mierników cyfrowych zabudowanych na stacji prób. Wszystkie przyrządy pomiarowe pozwalają na przesyłanie wyników pomiarów do komputera w celu ich rejestracji.

Pod blatem stacji prób znajdują się połączenia elektryczne, przekaźniki sterowania maszynami stacji prób itp. Pulpit wyposażony jest w koła jezdne, tak aby można go było ustawiać blisko zespołu maszynowego w sposób nieutrudniający dostępu do podzespołów wymagających obsługi podczas badania czy kontroli chłodziarki powietrza.

11. Ogólne zasady diagnozowania urządzeń technicznych

Diagnostyka techniczna zajmuje się oceną stanu obiektu technicznego lub procesu w określonej chwili uznanej za ważną [64].

Istota diagnostyki technicznej polega na określaniu stanu maszyny w sposób pośredni bez demontażu, na podstawie pomiaru generowanych sygnałów diagnostycznych i porównaniu ich z wartościami nominalnymi. Do podstawowych zadań diagnostyki technicznej należą m.in.:

- badanie rozwijających się uszkodzeń oraz ich symptomów,
- opracowanie metod i środków do badania oraz selekcji symptomów,
- opracowanie decyzji diagnostycznych o stanie i wynikających z nich rodzajów oraz zakresów czynności profilaktycznych.

Określenie stanu obiektu technicznego w danej, ważnej chwili jest niezbędne, aby było możliwe porównanie stanu rzeczywistego (chwilowego) obiektu ze stanem wzorcowym. Umożliwia to wydanie orzeczenia o zdatności lub niezdatności obiektu technicznego, określenie genezy zaistniałego stanu oraz dokonanie prognozy przyszłych stanów obiektu.

W diagnostyce technicznej korzysta się z modelu energetycznego [64], tj. przemiany energetycznej wywołanej stanem obiektu. Przedmiotem badań są więc zmiany wielkości fizycznych opisujących energię emitowaną poza system, a informacja diagnostyczna jest zawarta w wartościach tych wielkości lub intensywności ich zmian.

Najważniejszym warunkiem przyjęcia wielkości fizycznej za podstawę do orzeczenia diagnostycznego jest fizyczna interpretacja zależności między zmianą stanu obiektu a zmianą wartości tej wielkości. Oznacza to, że wielkość fizyczna musi opisywać przemianę zachodzącą w systemie lub właściwości systemu po jej zajściu. Największą wartość diagnostyczną mają wielkości fizyczne, których zmiana wartości zachodzi wtedy i tylko wtedy, gdy następuje zmiana stanu systemu [16].

Stan obiektów technicznych jest uwarunkowany czynnikami konstrukcyjnymi i czynnikami technologicznymi. W czasie eksploatacji obiektu technicznego działają na niego różne czynniki zewnętrzne zarówno obiektywne (np. warunki meteorologiczne, biologiczne, mechaniczne), jak i czynniki wewnętrzne (rodzaj ruchu, charakterystyka nacisków jednostkowych itp.). Czynniki te mają charakter losowy i dlatego

jednakowe obiekty, które przepracowały ten sam okres, mogą znajdować się w różnych stanach technicznych.

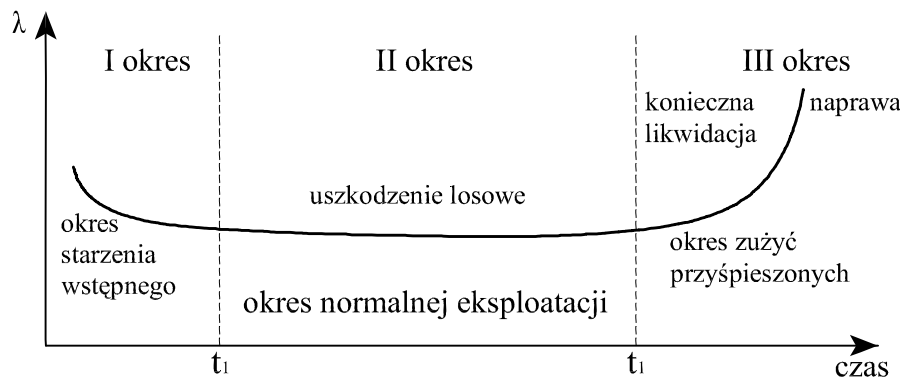
Obiekt znajduje się w stanie zdatności, jeżeli wartości wszystkich parametrów stanu znajdują się w dopuszczalnych granicach, czyli spełnia on określone wymagania.

Gdy wartość choćby jednego parametru stanu wykracza poza dopuszczalne granice, wówczas obiekt nie spełnia wymagań, czyli znajduje się w stanie niezdatności [65].

W procesie eksploatacji obiektów technicznych wyróżnia się uszkodzenia przypadkowe (nagłe) i zużyciowe (naturalnie) [65]. Uszkodzenia nagłe powstają w wyniku działania bodźców skokowych, powodujących przekroczenie ustalonych wartości dopuszczalnych parametrów poprawnej pracy. Uszkodzeń nagłych nie można przewidzieć na podstawie diagnostyki.

Uszkodzenia zużyciowe są wynikiem nieodwracalnych zmian właściwości początkowych obiektu, zachodzących podczas eksploatacji na skutek procesów starzenia i używania się obiektu. Uszkodzenia te powstają od bodźców wewnętrznych i zewnętrznych, powodujących nieodwracalne zmiany właściwości użytkowych części maszyn. Uszkodzenia te kumulują się w czasie użytkowania obiektu i można je przewidywać, dysponując wynikami pomiarów diagnostycznych.

Typowy przebieg intensywności uszkodzeń maszyn podczas eksploatacji przedstawiono na rys. 11.1 [65].



Rys. 11.1. Przebieg intensywności uszkodzeń maszyn podczas eksploatacji

Ze względów technicznych można wyróżnić następujące zużycia obiektów technicznych: zużycie ścierne, adhezyjne, plastyczne, zmęczeniowe, korozyjne, erozyjne, kawitacyjne i ciepłne.

Praktycznie wyróżnia się następującą klasyfikację uszkodzeń:

- uszkodzenia powstałe wskutek błędów projektowania i konstruowania obiektu, najczęściej w razie nieuwzględnienia obciążeń ekstremalnych, tzn. wartości,

które w istotny sposób przekraczają obciążenia nominalne, prowadzące do tzw. uszkodzeń konstrukcyjnych,

- uszkodzenia powstałe wskutek błędów i niedokładności procesów technologicznych lub wad materiałów elementów obiektu, są to tzw. uszkodzenia produkcyjne (technologiczne),
- uszkodzenia powstałe w wyniku nieprzestrzegania obowiązujących zasad eksploatacji lub na skutek oddziaływań czynników zewnętrznych nieprzewidzianych dla warunków użytkowania danego obiektu, co prowadzi do przedwczesnego zużycia obiektu, są to tzw. uszkodzenia eksploatacyjne,
- uszkodzenia starzeniowe towarzyszące eksploatacji obiektów będących rezultatem nieodwracalnych zmian prowadzących do pogorszenia wytrzymałości i zdolności współdziałania poszczególnych elementów.

Zmniejszenie destrukcyjnego wpływu starzenia fizycznego i zużycie obiektów mechanicznych jest konieczne we wszystkich fazach istnienia obiektów. Zmniejszenie liczby uszkodzeń obiektów technicznych można uzyskać [65]:

- w dziedzinie konstrukcji – przez odpowiedni dobór materiałów i ich kształtów do obciążeń, kształtowanie nacisków jednostkowych, dobór materiałów i tworzyw na pary tarcie, wyeliminowanie tarcia suchego, powszechne stosowanie uszczelnień, zapewnienie odpowiedniej temperatury,
- w dziedzinie technologii – przez wybór optymalnego rodzaju obróbki, kształtowanie optymalnej warstwy wierzchniej, wybór właściwej obróbki cieplno-chemicznej, prawidłowy montaż i regulację,
- w dziedzinie eksploatacji – przez przestrzeganie częstotliwości i zakresu czynności obsługowych (smarowanie, regulacja, ochrona przed korozją), unikanie przeciążeń i gwałtownych zmian warunków pracy, monitorowanie stanu.

Najszerze oddziaływanie diagnostyczne na stan obiektu występuje podczas jego eksploatacji [66].

Do eksploatacyjnych metod przeciwdziałania uszkodzeniom obiektów technicznych zalicza się:

- racjonalną eksploatację obiektów technicznych w zadanych warunkach i określonym przeznaczeniu,
- badanie stanu i monitorowanie rozwijających się uszkodzeń za pomocą diagnostyki technicznej,
- przestrzeganie wymagań określonych w dokumentacji techniczno-ruchowej w zakresie częstotliwości i czynności obsługi technicznej,
- badania statystyczne uszkodzeń w czasie eksploatacji na potrzeby modernizacji (zmian konstrukcji) obiektu technicznego, racjonalnej gospodarki częściami zamiennymi itp.

Należy podkreślić, że niewłaściwa eksploatacja obiektów technicznych powoduje intensywne oddziaływanie procesów zużyciowych, prowadzących do przedwczesnych uszkodzeń. Korzystanie z diagnostyki technicznej obiektów umożliwia wyprzedzające

wykrycie zbliżającego się uszkodzenia, co pozwala na odpowiednie programowanie wyłączenia tego obiektu z eksploatacji lub jego naprawy.

Uogólniając podane stwierdzenia, można przyjąć, że proces diagnostyczny obiektów technicznych sprowadza się do trzech podstawowych czynności [30]:

- pomiaru wybranych parametrów diagnostycznych i porównaniu ich wartości z wartościami odniesienia (wzorca),
- wykrycie przyczyn i charakteru odchyłań od wartości odniesienia,
- sprecyzowanie jakościowej i ilościowej prognozy stanu obiektu (maszyny) w funkcji czasu.

W diagnostyce technicznej korzysta się z różnych wskaźników określających stan techniczny obiektu [17, 30]. Przykładowo w pracy [30] wymienia się:

- sprowadzenie geometrycznych parametrów stanu technicznego uzyskiwanych drogą pomiarów bezpośrednich w warunkach statycznych,
- wykorzystanie zjawisk promieniotwórczych do badania zużycia elementów maszyn,
- wykorzystanie zjawisk zmian składu chemicznego i udziału zanieczyszczeń mechanicznych w mediach smarujących maszyny.

Wymienione metody są na ogół pracochłonne (geometryczne) lub czasochłonne (dotyczące promieniotwórczości i składu chemicznego) i według [30] nie nadają się do kontroli maszyn nowych, np. u producenta. Wymienionych wad pozbawiona jest m.in. metoda wibroakustyczna [17, 30].

Jeśli przyjmie się, że diagnostyka jest badaniem reakcji obiektu na oddziaływania energetyczne, to zmiana energii może być źródłem informacji o stanie tego obiektu [16]. Wiąże się to m.in. z możliwością rejestracji sygnałów cieplnych emitowanych z powierzchni badanego obiektu, np. za pomocą kamer termowizyjnych lub pirometrów. Sygnały te mogą być podstawą do diagnostyki technicznej maszyn (obiektów technicznych).

12. Diagnostyka termowizyjna obiektów technicznych

W termowizyjnych badaniach diagnostycznych obiektów technologicznych korzysta się z informacji zawartych w sygnałach cieplnych wyemitowanych z tych obiektów [12, 16, 40]. Źródłami ciepła są podzespoły, w których następuje przetwarzanie różnych rodzajów energii (np. mechanicznej, elektrycznej) w energię cieplną. Źródła te mogą być przyczyną zmiany cech użytkowych obiektu, a jeśli wynikają one z niesprawności elementów lub podzespołów mogą prowadzić do awarii obiektu.

Każde dobrze pracujące urządzenie techniczne ma swój określony obraz cieplny. Jeśli w urządzeniu tym występują uszkodzone lub zużyte elementy, to obraz cieplny odbiega od obrazu urządzenia pracującego prawidłowo. Dlatego też analiza obrazów termalnych wykonanych w podczerwieni może być bogatym źródłem informacji nie tylko o stanie technicznym, jakości wykonania i montażu urządzenia, ale także źródłem informacji o tych cechach, które decydują o jego funkcjach użytkowych.

Według pracy [62] pomiar termograficzny należy rozpoczynać od wykonania ogólnego obrazu urządzenia, przy czym należy dokonać oceny czy rozkład temperatury jest zgodny z przewidywaniami. Następnie wykonuje się szczegółowe zobrazowania poszczególnych elementów urządzenia.

W czasie pomiarów należy zwracać szczególną uwagę na małe elementy, np. przewody zasilające urządzenia w gorące media, otwory w izolacji łożyska itp. Temperatura tych elementów może być wysoka, a wykonanie rejestracji ze zbyt dużej odległości spowoduje ich pozorne obniżenie. Praktyka wykazuje, że popełnione w ten sposób błędy mogą wynosić nawet kilkadziesiąt procent wartości temperatury.

Należy również zwracać dużą uwagę, aby w zobrazowaniach termalnych był przyjmowany właściwy współczynnik emisyjności badanych powierzchni. Elementy badanych urządzeń mogą być bardzo gładkie, co powoduje częściowe odbicie promieniowania otoczenia i może prowadzić do dużego zniekształcenia mierzonej temperatury. Dlatego też w sytuacjach wątpliwych należy dokonywać, chociażby uproszczone, wyznaczenie wartości współczynników emisyjności badanych elementów maszyny. Jeśli współczynnik emisyjności badanego elementu jest mały, wskazane jest pokrycie jego powierzchni cienką warstwą, np. farby o znanej, dużej emisyjności.

Jak się okazuje [16, 62] wspólną cechą procedur termowizyjnych badań diagnostycznych jest konieczność uwzględnienia właściwości promiennych obiektów i otoczenia. Sygnał cieplny badanego urządzenia zawiera dwie składowe: promieniowanie

własne i promieniowanie tła odbitego przez badaną powierzchnię. Pierwsza składowa zależy od temperatury T_{ob} i emisyjności obiektu $\varepsilon(\lambda, \gamma, T)$, gdzie λ oznacza długość fali promieniowania, a γ – kąt zawarty między normalną a kierunkiem obserwacji badanej powierzchni, druga składowa dotyczy natomiast cech otaczającego go tła: T_t , ε [16].

Promieniowanie własne obiektu zawiera informacje o jego temperaturze i emisyjności, promieniowanie odbite natomiast stanowi zakłócenia, przy czym jest ono wypadkową odbitego promieniowania obiektów sąsiednich. Wpływ promieniowania odbitego od badanego obiektu jest mały i dlatego, gdy emisyjność obiektu jest duża ($\varepsilon \approx 1$), może być on pomijany. Wpływ promieniowania odbitego tła jest tym większy, im mniejsza jest wartość emisyjności i temperatura badanego obiektu oraz im większa jest temperatura tła [16].

W termowizyjnych badaniach diagnostycznych urządzeń technicznych, ze względu na małe odległości między obiektem a urządzeniem termowizyjnym, nie uwzględnia się wpływu atmosfery na wyniki pomiarów. W tych warunkach sygnał wywołany tylko promieniowaniem własnym obiektu określa zależność [16]

$$I(T_{ob}) = \frac{I_{det} - I(T_t)(1 - \varepsilon)}{\varepsilon}, \quad (12.1)$$

gdzie:

- I_{det} – sygnał związany z całkowitym promieniowaniem docierającym do detektora,
- T_{ob} – temperatura obiektu,
- T_t – temperatura tła,
- $I(T_{ob})\varepsilon$ – sygnał związany z promieniowaniem własnym obiektu,
- $I(T_t)(1 - \varepsilon)$ – sygnał związany z promieniowaniem tła odbitym od obiektu,
- ε – emisyjność obiektu.

Dla znanych wartości temperatury tła T_t i emisyjności obiektu ε na ogół we współczesnych kamerach termowizyjnych następuje automatyczne korygowanie wpływu wymienionych czynników na obraz termalny.

Wyniki pomiarów termograficznych urządzeń przemysłowych są przedstawiane w różny sposób. Najczęściej jest to zestaw pojedynczych termogramów elementów obiektu [60], co jednak niekiedy, np. w przypadku skomplikowanych urządzeń, może nastęrczać wiele trudności w interpretacji uzyskanych wyników badań.

W pracy [62] sugeruje się, że najkorzystniejszą formą opracowania jest wniesienie rozkładu temperatury na rysunek techniczny maszyny.

Bilans cieplny na podstawie pozyskanego termogramu może być obliczony za pomocą wzoru Newtona [62]

$$\dot{Q} = A\alpha(T_{ob} - T_t). \quad (12.2)$$

Korzystanie ze wzoru (12.2) wymaga znajomości pól równych temperatur, które mogą być odczytane bezpośrednio z termogramu, ale nie powinny one być zniekształ-

cone perspektywicznie (geometrycznie). Przy występowaniu takich odkształceń muszą być one usunięte przez odpowiednie przetworzenie obrazu za pomocą różnych programów komputerowych. Powierzchnię niektórych elementów o skomplikowanym przestrzennym kształcie, np. sieci przewodów rurowych, najwygodniej jest wyznaczyć na podstawie obmiaru bezpośredniego i danych z dokumentacji obiektu.

Podkreślić należy, iż termodiagnostyka w podczerwieni, zwłaszcza obrazowa obiektów technicznych, od kilku lat znajduje się w fazie bardzo gwałtownej popularyzacji [59]. Jest to głównie wynikiem stosowania niewymagających chłodzenia matryc detektorów termicznych, zwłaszcza na bazie amorficznego krzemu.

Proste, lekkie i tanie termalne kamery mają wszelkie dane przejąć rolę podstawowej aparatury do lokalizacji określonych problemów.

Bardzo dobre już parametry rozdzielczościowe i dynamiczne kamer termalnych skutkują szybkim rozwojem coraz to nowych metod badań nieniszczących. W konsekwencji leży to u podstaw istotnego postępu diagnostyki technicznej.

13. Emisyjność elementów chłodziarek powietrza kopalnianego oraz materiałów użytych do ich budowy

Ocena stanu pracy chłodziarek powietrza kopalnianego realizowana przy korzystaniu z kamery termowizyjnej polega na zdalnym i bezstykowym pomiarze rozkładu temperatury na powierzchniach elementów urządzenia chłodniczego. Metoda ta jest oparta na obserwacji i zapisie rozkładu promieniowania podczerwonego wysyłanego przez każde ciało, którego temperatura jest wyższa od zera bezwzględnego i przekształceniu tego promieniowania w światło widzialne. W rezultacie, w kamerze termowizyjnej otrzymuje się barwny obraz niewidzialnego promieniowania podczerwonego emitowanego przez badany obiekt. Jednak emitowany strumień promieniowania cieplnego jest zazwyczaj różny dla wielu ciał, mimo że ich temperatura jest taka sama. Dzieje się tak, dlatego że każde ciało ma określoną zdolność do emitowania promieniowania, którą charakteryzuje się współczynnikiem zwanym emisyjnością.

Wartość współczynnika emisyjności zależy od rodzaju ciała, jego temperatury, długości fali promieniowanej oraz od stanu powierzchni (polerowana, matowa, itp.).

Urządzenia chłodnicze powietrza kopalnianego są urządzeniami złożonymi z wielu mniej lub bardziej skomplikowanych elementów wykonanych z różnych materiałów. W szczególności wiele elementów jest wykonanych ze stali wysokogatunkowej, miedzi, staliwa, aluminium itp. Dlatego też, w celu prawidłowej oceny pola temperatury elementów urządzeń chłodniczych powietrza kopalnianego w ramach projektu badawczego 4T12A03527, przeprowadzono badania właściwości emisyjnych podstawowych materiałów stosowanych w tych urządzeniach. Badaniami objęto zwłaszcza: sprężarki, skraplacze, rurociągi tłoczne gazu sprężonego, krućce doprowadzające wodę do skraplacza i odprowadzające wodę ze skraplacza.

Emisyjność dla rzeczywistego obiektu może zmieniać się w czasie τ , a ponadto jest zależna od kąta obserwacji γ . Zgodnie z pracą [40], emisyjność danego ciała jest funkcją kąta obserwacji γ , długości fali λ , temperatury ciała T oraz czasu τ

$$\varepsilon = \varepsilon_{\lambda} = f(\gamma, \lambda, T, \tau). \quad (13.1)$$

Mimo że emisyjność zależy od wielu czynników, to w literaturze jest podana emisyjność całkowita ε w kierunku normalnym (dla danej temperatury i długości fali). Rzadziej zamieszczane są informacje o temperaturowej zależności emisyjno-

ści $\varepsilon(t)$. W wielu podręcznikach i katalogach podaje się emisyjność w postaci tabelarycznej [24, 40, 48, 49].

Publikowane dane o emisyjności widmowej są niepełne i najczęściej dotyczą fragmentu widma optycznego związanego z jakąś aplikacją opisywaną przez autorów.

Średnie współczynniki emisyjności wybranych materiałów podano w tabeli 13.1.

Podczas pomiarów temperatury metodami termograficznymi uwzględnia się w nastawach średnią emisyjność monochromatyczną w kierunku normalnym do powierzchni w przedziale widmowym, w którym pracuje dany przyrząd pomiarowy. Wielkość ta dla przedziału widmowego λ_1 – λ_2 jest dana zależnością

$$\bar{\varepsilon}(\lambda_1, \lambda_2, T) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon(\lambda) M_{B\lambda}(\lambda, T) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{B\lambda}(\lambda, T) d\lambda} \quad (13.2)$$

przy czym $M_{B\lambda}$ oznacza moc promieniowania wyemitowaną przez jednostkę powierzchni ciała czarnego w kąt bryłowy półpełny, $W/(m^2 \cdot \mu m)$.

W celu wyznaczenia przybliżonej wartości uśrednionych emisyjności materiałów korzysta się z kamer termowizyjnych lub pirometrów.

Podczas wyznaczania emisyjności elementów chłodziarek powietrza kopalnianego zastosowano metodę, w której korzysta się z emisyjności odniesienia.

W celu wyznaczenia przybliżonej wartości emisyjności badanego elementu chłodziarki naklejono na ten element materiał o znanej emisyjności (taśmę koloru czarnego, matowego, dobrze przewodzącą ciepło o współczynniku emisyjności 0,98), uzyskując w ten sposób punkty odniesienia (rys. 13.1 i 13.2). Z kolei rozgrzano obiekt do temperatury wyższej o około 20–50 °C od temperatury otoczenia. Następnie ustawiono punkt pomiarowy kamery lub pirometru z celownikiem laserowym na obiekcie w miejscu, gdzie znajdował się obszar z naklejonym materiałem i odczytano temperaturę obiektu odniesienia. W następnej kolejności skierowano punkt pomiarowy kamery lub pirometru poza naklejony obszar (znajdujący się obok naklejonego materiału) i tak dobierano nastawę emisyjności, aby kamera lub pirometr wskazywały taką samą temperaturę jak w punkcie odniesienia. Badania emisyjności elementów chłodziarek powietrza kopalnianego przeprowadzono w zakresie widmowym od 7,5 do 14 μm , wykorzystując pirometr Thermopoint 64P z celownikiem laserowym z dokładnością odczytu $\pm 1\%$ lub kamerę termowizyjną ThermaCAM™ PM 575 o dokładności pomiaru $\pm 2\%$ (rozdz. 4).

Obecnie w polskich kopalniach podziemnych stosuje się przede wszystkim (w 84%) chłodziarki powietrza kopalnianego typów DV i TS, dlatego badania współczynników emisyjności dotyczyły podstawowych elementów zespołów maszynowych wymienionych chłodziarek (rozdz. 8).

Tabela 13.1. Średni współczynnik emisyjności różnych materiałów [49]

Material	Temperatura T , °C	Współczynnik emisyjności, ε
Aluminium polerowane	50÷100	0,04÷0,06
Aluminium z chropowatą powierzchnią	20÷50	0,06÷0,07
Aluminium silnie utlenione	50÷500	0,2÷0,3
Azbestowy karton	20	0,96
Azbestowa bibuła	40÷400	0,93÷0,95
Błacha cynkowa	50	0,20
Błacha ocynkowana błyszcząca	30	0,23
Błacha stalowa niklowana	20	0,11
Błacha stalowa walcowana	50	0,56
Brąz chropowaty	50÷150	0,55
Brąz polerowany	50	0,1
Cegła czerwona porowata	20	0,88÷0,93
Cegła szamotowa	20	0,85
Chrom polerowany	50	0,10
Cyna błyszcząca	20÷50	0,04÷0,06
Cynk polerowany	200÷300	0,04÷0,05
Ebonit	20	0,95
Farby olejne o różnych kolorach	100	0,92÷0,96
Gips	20	0,8÷0,9
Guma miękka porowata	20	0,86
Lakier emaliowany	20	0,85÷0,95
Lód kryształ	-10	0,98
Miedź polerowana	50÷100	0,02
Miedź utleniona	50	0,6÷0,7
Mika w grubej warstwie	-	0,72
Mosiądz matowy	20÷350	0,22
Mosiądz polerowany	200	0,03
Nikiel technicznie czysty, polerowany	100÷200	0,045÷0,07
Papier biały	20	0,7÷0,9
Papier czarny matowy	20	0,94
Sadza	20÷400	0,95÷0,97
Porcelana glazurowana	20	0,92
Srebro czyste polerowane	200	0,02
Stal niklowana niepolerowana	20	0,11÷0,40
Stal silnie utleniona	50	0,88
Surówka polerowana	200	0,21
Szkło silikatowe	20÷100	0,94÷0,91
Śnieg	-10	0,85
Tytan polerowany	200	0,15
Tytan utleniony	200	0,40
Warstwa oleju na powierzchni niklu (grubość oleju 25 μm)	20	0,72
Warstwa wody na powierzchni metalowej	20	0,98
Woda destylowana	20	0,96
Woda (warstwa o grubości > 0,1 mm)	0÷100	0,95÷0,98
Złoto polerowane	130÷200	0,02
Żeliwo	50	0,81



Rys. 13.1. Punkty odniesienia w zespole maszynowym chłodziarki TS-300/1

Badaniom poddano następujące elementy chłodziarek typu TS:

- sprężarki (głowice cylindrowe: 1A, 1B i pokrywy mis olejowych: 2A, 2B) – rys. 13.3,
- skraplacze chłodziarek: 3A, 3B i 3C – rys. 13.4,
- rurociągi tłoczne gazu sprężonego: 4A, 4B – rys. 13.5,
- krońce: doprowadzające (5) i odprowadzające (6) wodę ze skraplacza chłodziarki – rys. 13.6.

W chłodziarkach typu DV (po remontach) badaniami współczynników emisyjności objęto:

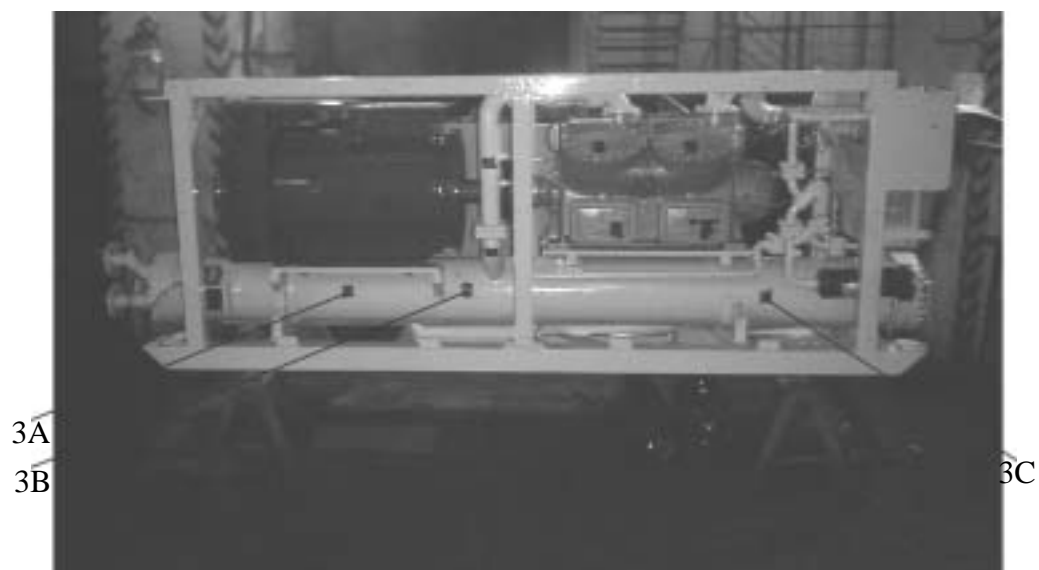
- sprężarki (głowice cylindrowe 1A, 1B i pokrywy misy olejowej 2A, 2B) – rys. 13.7,
- skraplacze z doprowadzeniem (3A i 3B) oraz odprowadzeniem (4A i 4B) wody – rys. 13.8,
- pokrywę czołową skraplacza z doprowadzeniem (5) i odprowadzeniem (6) wody oraz rurociągi (7) łączące skraplacze urządzeń chłodniczych – rys. 13.9,
- rurociągi tłoczne (8) gazu sprężonego – rys. 13.10,
- krońce: doprowadzające (9) i odprowadzające (10) wodę ze skraplaczy chłodziarek – rys. 13.11.



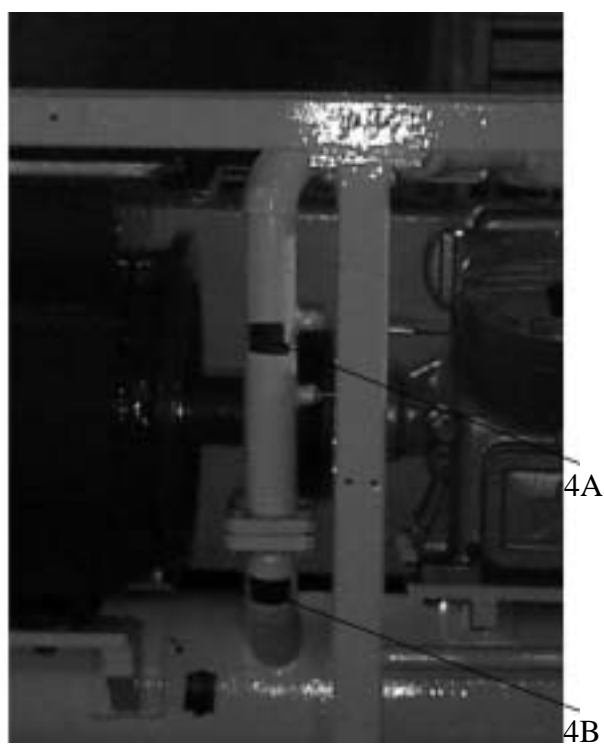
Rys. 13.2. Punkty odniesienia w zespole maszynowym urządzenia chłodniczego DV-290 po remoncie



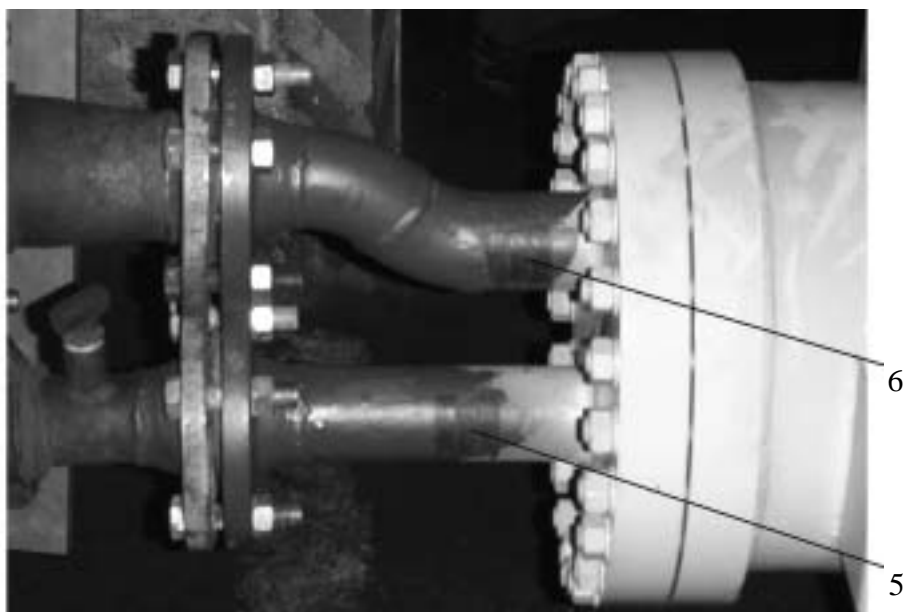
Rys. 13.3. Głowice cylindrowe i pokrywy miski olejowej sprężarki TS-300/1



Rys. 13.4. Skraplacz chłodziarki TS-300/1



Rys. 13.5. Rurociąg tłoczny gazu sprężonego chłodziarki TS-300/1



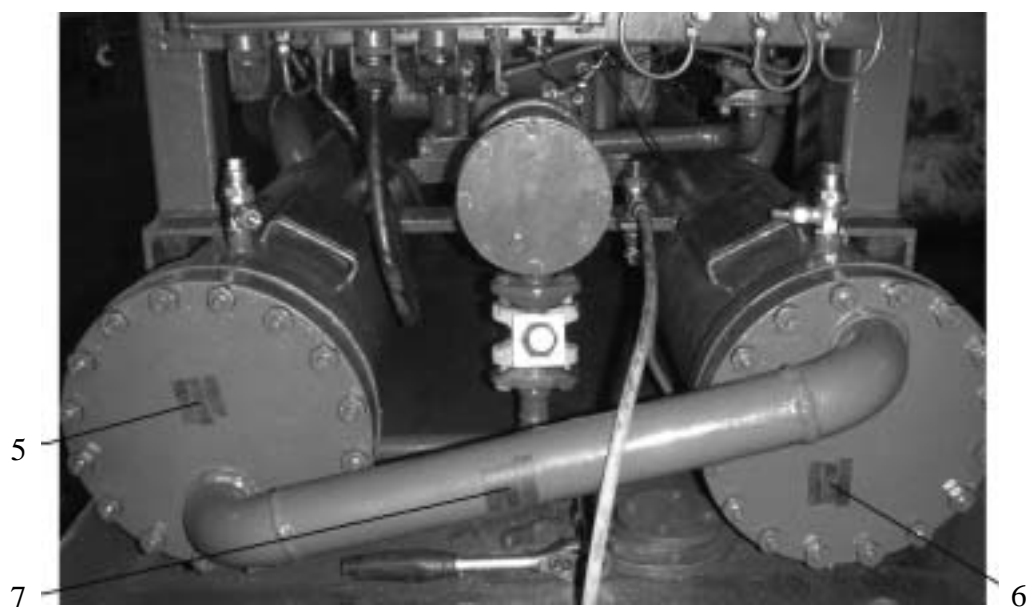
Rys. 13.6. Krońce: doprowadzający wodę do skraplacza (5) i odprowadzający wodę ze skraplacza (6) chłodziarki TS-300/1



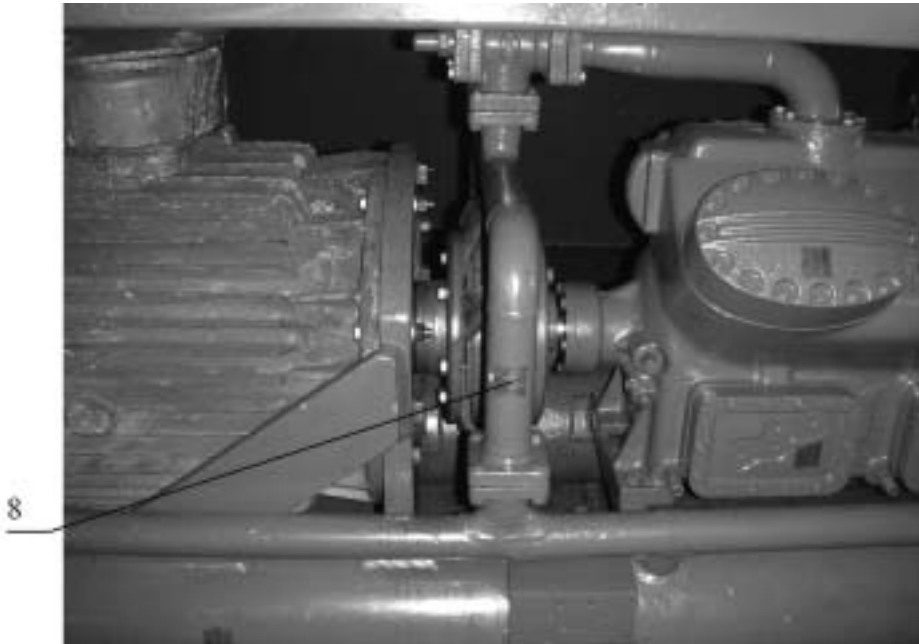
Rys. 13.7. Głowice cylindrowe (1A i 1B) i pokrywy miski olejowej (2A,2B) sprężarki chłodziarki DV-290



Rys. 13.8. Skraplacz z odprowadzeniem wody (4A, 4B) oraz doprowadzeniem wody (3A, 3B) chłodziarki DV-290



Rys. 13.9. Pokrywa czołowa skraplacza z odprowadzeniem wody (5), pokrywa czołowa skraplacza z doprowadzeniem wody (6) i rurociąg (7) łączący skraplacze urządzenia chłodniczego DV-290



Rys. 13.10. Rurociąg tłoczny (8) gazu sprężonego chłodziarki DV-290



Rys. 13.11. Krońce: doprowadzający (9) i odprowadzający (10) wodę ze skraplacza chłodziarki DV-290

Badaniom poddano nowo wyprodukowane urządzenia chłodnicze typu TS oraz po kapitalnych remontach chłodziarki typu DV. Badania prowadzono na stanowisku prób w firmie ZUH Termospec Sp. z o.o. w Żorach [40].

Przed przystąpieniem do pomiarów emisyjności urządzenia objęte badaniami zostały uruchomione w celu osiągnięcia przez nie odpowiedniej temperatury.

Dla każdego punktu pomiarowego dokonano pięciu niezależnych odczytów, które zostały następnie uśrednione.

Wykonano po 5 serii pomiarowych dla każdego badanego elementu chłodziarki w różnych ich temperaturach, przy czym dla urządzeń chłodniczych typu TS-300/1 zakres temperatur zawierał się w przedziale od ok. 20 °C do 71 °C, natomiast dla urządzenia chłodniczego DV-290 zakres ten wynosił ok. 30 °C do 94 °C.

Odczyty emisyjności były dokonywane dla następujących zmian temperaturowych wynoszących około:

- dla pokrywy miski olejowej sprężarki, co 4 °C,
- dla głowicy cylindrowej sprężarki, co 5 °C,
- dla skraplacza, co 2–5 °C,
- dla rurociągu tłoczego gazu sprężonego, co 10 °C,
- dla króćców doprowadzającego wodę do skraplacza i odprowadzającego wodę ze skraplacza, co 1 °C.

W hali na stanowisku prób chłodziarek powietrza kopalnianego, w czasie wykonywania badań współczynników emisyjności poszczególnych elementów urządzeń chłodniczych, temperatura powietrza (otoczenia) wynosiła od 10,5 °C do 23,5 °C, a wilgotność względna powietrza od 50% do 70%.

Uśrednione wartości współczynników emisyjności dla wyróżnionych elementów chłodziarek typu TS-300/1 zestawiono w tabeli 13.2, a dla chłodziarek typu DV-290 w tabeli 13.3.

Tabela 13.2. Zestawienie zbiorcze średnich wartości emisyjności poszczególnych elementów chłodziarek typu TS-300/1

Punkt pomiarowy	Nazwa elementu	ε_{sr}	ε_{sr}	ε_{sr}
		z I badania	z II badania	
		dla 5 serii pomiarowych		
1A, 1B	Głowica cylindrowa sprężarki	0,96	0,91	0,93
2A, 2B	Pokrywy miski olejowej	0,96	0,89	0,92
3A, 3B, 3C	Skraplacz	0,97	0,98	0,97
4A, 4B	Rurociąg tłoczny gazu sprężonego	0,96	0,97	0,96
5	Króćciec doprowadzający wodę do skraplacza	0,95	0,93	0,94
6	Króćciec odprowadzający wodę ze skraplacza	0,95	0,94	0,94

Badaniom emisyjności poddano wybrane materiały używane w budowie urządzeń chłodniczych, a zwłaszcza: stal wysokogatunkową 18G2A, stal St3S, staliwo, i mosiądz. Zestawienie wartości współczynników emisyjności dla wymienionych materiałów podano w tabeli 13.4.

Należy wyraźnie podkreślić, iż niewłaściwe przyjęcie wartości współczynników emisyjności materiałów stosowanych w budowie urządzeń chłodniczych powietrza kopalnianego może być przyczyną błędnych interpretacji wyników badań określonych pól temperatury, co z kolei może być przyczyną niewłaściwej diagnostyki tych urządzeń.

14. Zobrazowania termalne kopalnianych urządzeń chłodniczych powietrza kopalnianego

Aby zapewnić właściwe warunki klimatyczne w miejscach pracy kopalń głębokich o trudnych warunkach termicznych, w coraz szerszym zakresie stosuje się urządzenia do ochładzania powietrza kopalnianego (rozd. 7, 8).

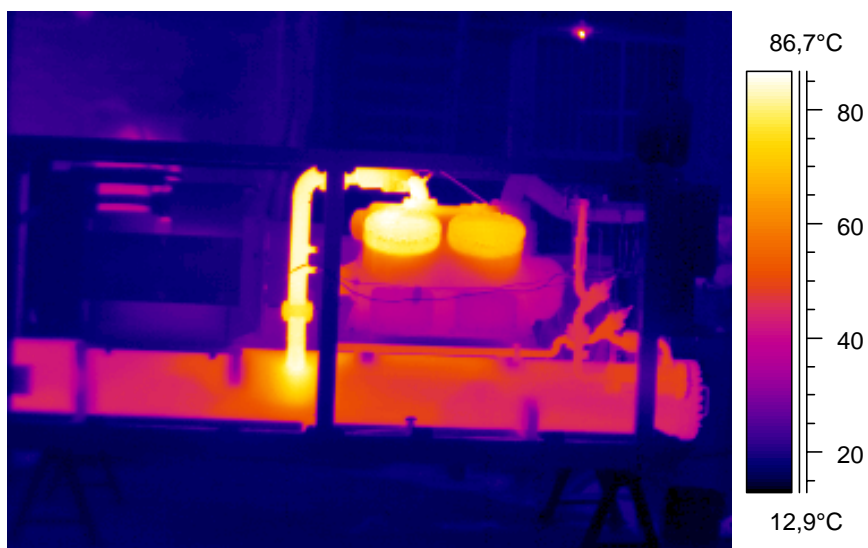
Awarye chłodziarek powietrza kopalnianego, jak to już wspomniano (rozdział 1), utrudniają prowadzenie procesu technologicznego i pogarszają bezpieczeństwo pracy podziemnych załóg górniczych. Większość awarii chłodziarek powietrza kopalnianego wymaga ich demontażu oraz remontu w specjalistycznych zakładach naprawczych poza terenem kopalni. Diagnostyka termalna tych urządzeń na podstawie badań termowizyjnych (lub pirometrycznych) w miejscu ich pracy może dostarczać bieżących informacji o poprawności lub wadliwości działania poszczególnych podzespołów, co pozwala na wczesne wykrycie zmniejszonej efektywności pracy chłodziarek powietrza kopalnianego. Umożliwia to m.in. podejmowanie odpowiednich środków profilaktycznych w celu uniknięcia kosztownych awarii oraz umożliwia ocenę wykonania drobnych napraw w miejscu pracy urządzenia chłodniczego.

Mając na uwadze ogólne zasady diagnostyki technicznej (rozd. 11) oraz diagnozowania termowizyjnego obiektów technicznych (rozd. 12, 13), przedstawiamy zobrazowania termowizyjne (termogramy) trzech typów chłodziarek powietrza kopalnianego o działaniu bezpośrednim oraz ważniejszych elementów tych urządzeń (rys. 14.1–14.8).

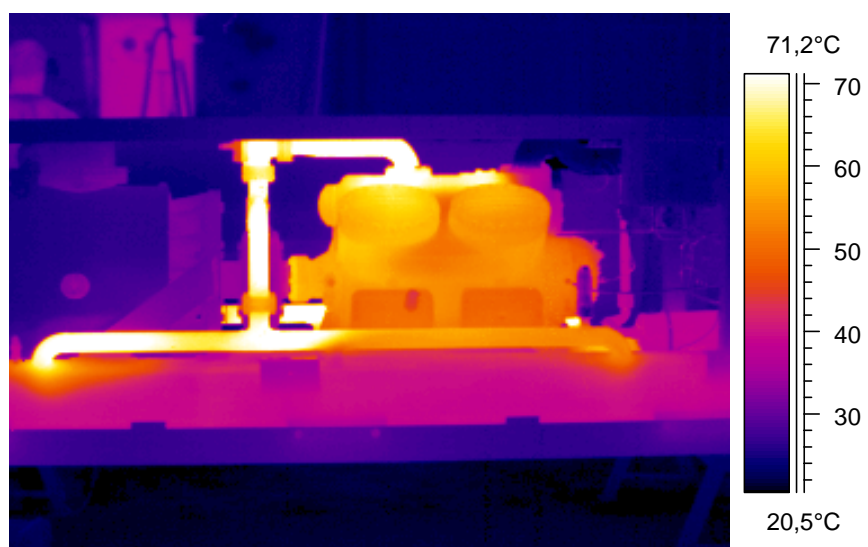
Korzystając z termogramów wykonanych dla konkretnych chłodziarek powietrza kopalnianego, możliwe jest określenie elementów tego urządzenia, które ulegają nadmiernemu nagrzewaniu się lub elementów, które nie uzyskują właściwej temperatury. Wymienione anomalie mogą świadczyć o nieprawidłowej pracy tych elementów, co może wskazywać na ich uszkodzenie lub złą jakość wykonania.

Jakościowo, nadmierne nagrzewanie się elementów chłodziarki, na podstawie termogramu rozpoznaje się po jasności zarejestrowanych kolorów.

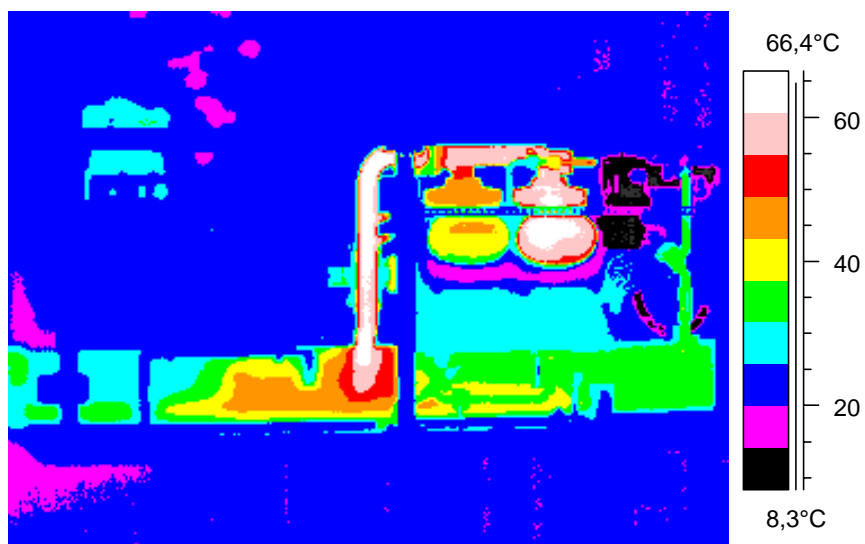
Na podstawie wykonanego termogramu można określić temperaturę poszczególnych elementów, korzystając m.in. z paska skalowego zamieszczonego po prawej stronie obrazu termograficznego.



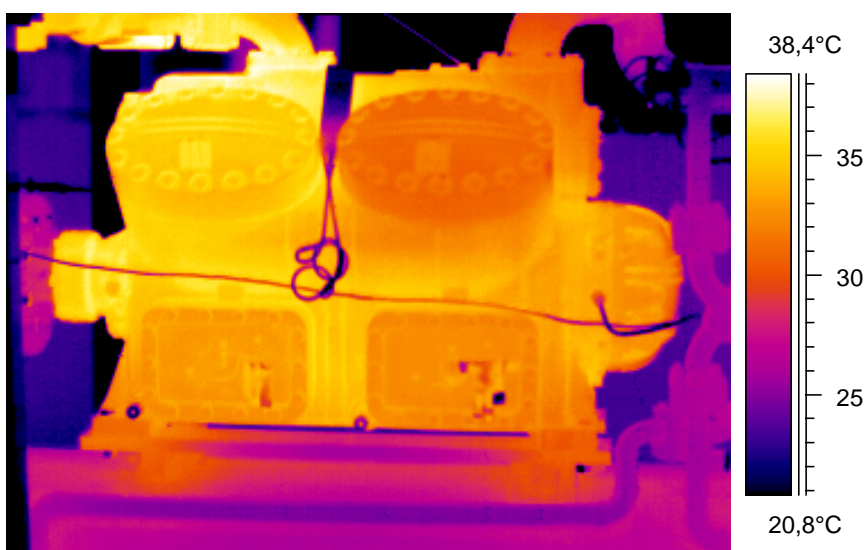
Rys. 14.1. Termogram urządzenia chłodniczego TS-300/1 – zespół maszynowy



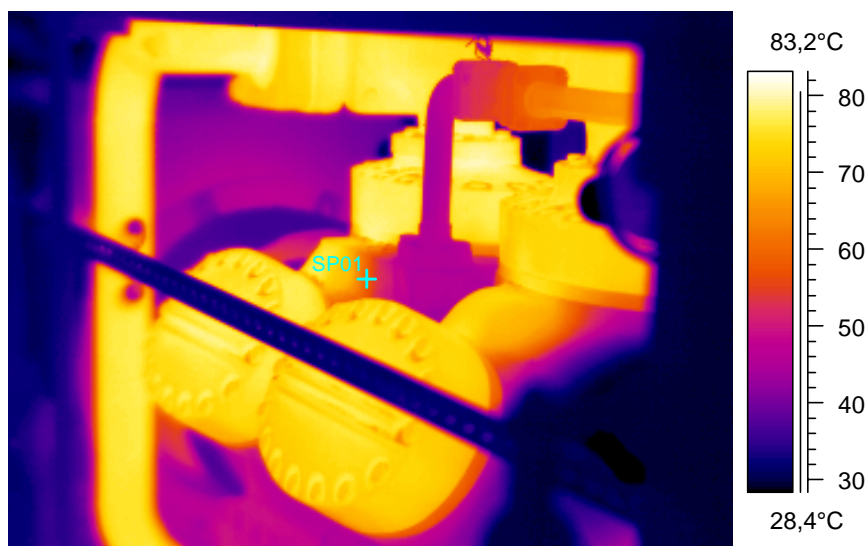
Rys. 14.2. Termogram urządzenia chłodniczego DV-290 – zespół maszynowy



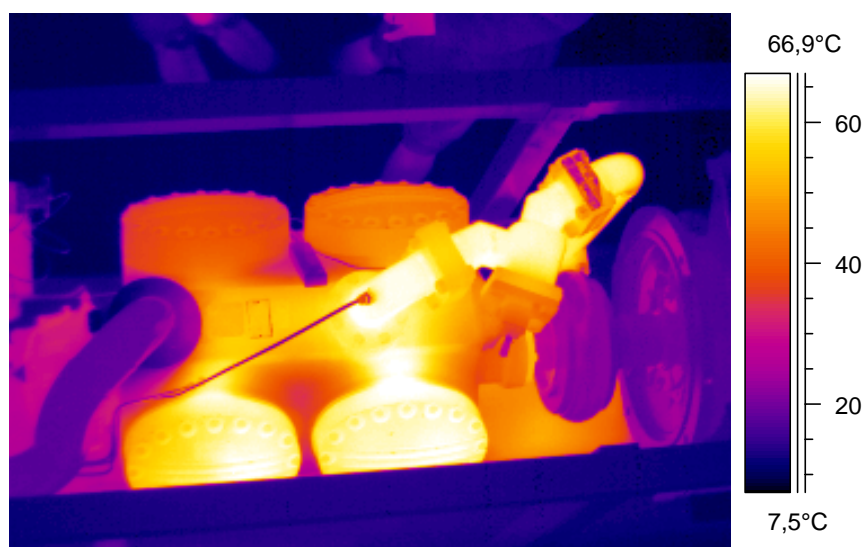
Rys. 14.3. Termogram urządzenia chłodniczego TS-350/1 – zespół maszynowy



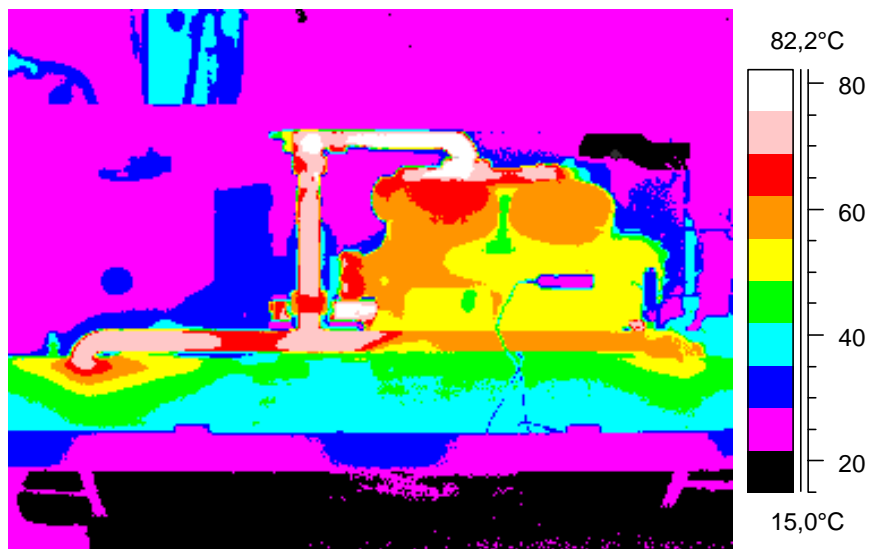
Rys. 14.4. Termogram sprężarki Carrier 5H86 (chłodziarka 300/1 i DV-290)



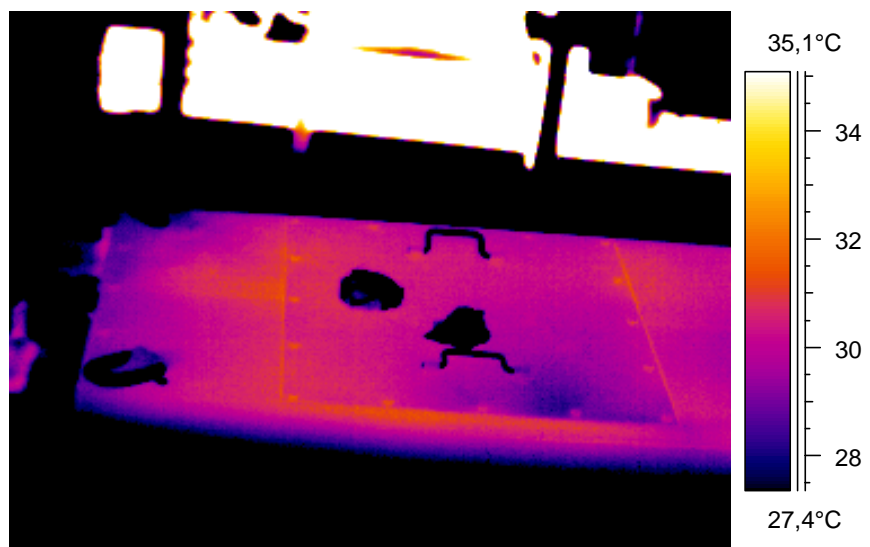
Rys. 14.5. Termogram sprężarki Carrier 5H120 (chłodziarka TS-350/1)



Rys. 14.6. Kolektory tłoczny i ssawny w chłodziarkach typu TS-300/1 i DV-290



Rys. 14.7. Obraz termalny skraplacza chłodziarki DV-290



Rys. 14.8. Termogram fragmentu parownika urządzenia chłodniczego TS-300/1

15. Ocena pracy urządzeń chłodniczych bezpośredniego działania na podstawie badań termowizyjnych

Diagnostyka termowizyjna podziemnych urządzeń chłodniczych umożliwia prowadzenie systematycznej kontroli ich stanu technicznego, co wpływa na wczesne wykrycie zmniejszonej efektywności działania poszczególnych podzespołów chłodziarek powietrza kopalnianego [18, 26]. Umożliwia to m.in. podejmowanie odpowiednich środków profilaktycznych dla uniknięcia kosztownych awarii.

W niniejszej monografii przedstawiamy sposób diagnozowania termowizyjnego zespołów maszynowych chłodziarek powietrza kopalnianego bezpośredniego działania obejmujący: sprężarki (głowice cylindrowe i miski olejowe), kolektory ssawne i tłoczne, skraplacze, filtry, zawory rozprężne, a także króćce doprowadzające wodę do skraplaczy i odprowadzające wodę ze skraplaczy oraz kolektory wlotowe czynników chłodniczych do parowników i kolektory wylotowe z parowników.

Sprężarka

Sprężarka jest najważniejszym urządzeniem każdej chłodziarki i powoduje przepływ czynnika chłodniczego w obiegu termodynamicznym przy zapewnieniu odpowiedniego ciśnienia w skraplaczu i parowniku. W badanych urządzeniach chłodniczych typów DV i TS stosuje się sprężarki tłokowe Carrier: 5H60, 5H86, 5H126. Sprężarki tłokowe składają się z cylindrów i tłoków, skrzyni korbowej, wału korbowego z korbowodami, łożysk ślizgowych oraz dławicy. Sprężanie czynnika chłodniczego w tych sprężarkach następuje za pomocą tłoka poruszającego się w cylindrze ruchem posuwisto-zwrotnym, sterowanie odbywa się zaworami ssawnymi i tłocznymi. W zależności od wydajności sprężarki liczba cylindrów może wynosić od 1 do 16, przy czym sprężarki Carrier 5H60 mają 6 cylindrów, sprężarki Carrier 5H86 – 8 cylindrów, a sprężarki Carrier 5H126 – 12 cylindrów.

Układ cylindrów w sprężarkach zależy od ich wydajności, rodzaju czynnika chłodniczego i przeznaczenia. W procesie sprężania czynnika chłodniczego następuje nagrzewanie się poszczególnych elementów, a zwłaszcza głowic cylindrowych. W związku z tym do oceny pracy sprężarek może być wykorzystana termografia, a zwłaszcza termowizja. W ocenie jakościowej pracy sprężarek analizuje się termogramy, na podstawie których ocenia się rozkład pola temperatury na głowicach cylin-

drowych. W przypadku pracy cylindrów umieszczonych od strony tłocznej ich temperatura jest wyższa od temperatury cylindrów znajdujących się po stronie ssawnej i wynosi ona odpowiednio około 70–80 °C oraz 60–70 °C (rys. 15.1). Wymienione temperatury odnoszą się do przypadku pracy dwóch tłoków w każdej głowicy. Jakościowo na podstawie zróżnicowanego rozkładu temperatury na głowicach sprężarki (różnica jakości w obrazach termalnych głowic) możliwa jest ocena ile cylindrów pracuje w sprężarce. Wspomniana różnica temperatur wynika z tego, że odparowany i przegrzany czynnik chłodniczy jest doprowadzony do kolektora sprężarki umieszczonego od strony ssawnej i powoduje chłodzenie tej części sprężarki.

Jeśli na danej głowicy występuje w przybliżeniu jednolity rozkład temperatury (jednolity kolor obrazu), w odpowiednio wysokiej temperaturze, to można uznać, że pracują dwa tłoki. W przypadku jeśli część powierzchni ma niższą temperaturę od drugiej części głowicy (różne kolory obrazu), to należy wnioskować o pracy tylko jednego cylindra w danej głowicy (rys. 15.2).

Znacznie zróżnicowana temperatura na powierzchni głowicy może wynikać z następujących powodów:

- jeden cylinder w głowicy został wyłączony przez pneumohydrauliczny układ regulacji wydajności (chłodziarka pracuje w warunkach niewymagających pełnej wydajności),
- jeden z cylindrów (o niższej temperaturze) ma uszkodzone płytki zaworowe ssawne lub tłoczne),
- jeden z cylindrów (o niższej temperaturze) jest w stanie awaryjnym, np. wskutek nadmiernych luzów między cylindrem i tłokiem lub nastąpiło uszkodzenie pierścieni tłocznych.

Jeśli natomiast pole temperatury głowicy jest jednolite, ale temperatura ta jest zbliżona do temperatury korpusu (kolor głowicy taki jak korpusu), to można stwierdzić, że w danej głowicy w żadnym z cylindrów nie następuje sprężanie. Badania te umożliwiają zatem ocenę stanu technicznego sprężarki (sprawność sprężarki).

Duża różnica między temperaturą na głowicach z cylindrami od strony tłocznej a głowicami z cylindrami od strony ssawnej, wynosząca powyżej 10 °C (wyraźna różnica barw na termogramach), wskazuje na prawidłową pracę sprężarki. Mała różnica temperatur na głowicach cylindrowych może świadczyć o rozszczelnieniu jednego z cylindrów i zmniejszeniu wydajności sprężarki (rys. 15.3).

Misa olejowa

Prawidłowe smarowanie sprężarek chłodniczych zapewnia długi okres ich eksploatacji, a to ściśle wiąże się z wysokimi wymaganiami dotyczącymi jakości stosowanych w nich olejów. Olej w sprężarce chłodniczej spełnia trzy podstawowe funkcje: zapewnia dobre smarowanie wszystkich będących w ruchu części, takich jak tłoki, łożyska ślizgowe wału korbowego, przenosi ciepło od obciążonych termicznie elementów jej konstrukcji do skrzyni korbowej i jest medium w pneumatyczno-

-hydraulicznym w układzie sterowania chłodziarki. Temperatura pokrywy miski olejowej nie powinna być niższa od minimalnej temperatury oleju w misce wynoszącej 8–10 °C (rys. 15.1). W przypadku obniżenia temperatury przegrzania par czynnika chłodniczego w parowniku może nastąpić przedostanie się do miski olejowej nieodparowanej cieczy chłodniczej, której parowanie powoduje obniżenie temperatury oleju i porywanie cząsteczek oleju do obiegu czynnika chłodniczego. Jest to niebezpieczne, gdyż zagraża brakiem smarowania układu korbowodowego wału sprężarki.

Kolektory tłoczne i ssawne

Podczas pracy chłodziarki w warunkach optymalnych temperatura kolektora tłoczego wynosi 70–80 °C (pod ciśnieniem sprężania 17 bar, co dla czynników chłodniczych R22, R19A i R407C odpowiada temperaturze skraplania 42 °C (rys. 15.1). Jeśli temperatura kolektora tłoczego wzrasta od 80 do 85 °C (co odpowiada ciśnieniu sprężania 19–20 barów), to następuje zmniejszenie wydajności skraplacza (rys. 15.3). Przyczynami tego zjawiska mogą być: zmniejszenie przepływu wody przez skraplacz, za wysoka temperatura wody wlotowej do skraplacza (wyższa od 32 °C) oraz zanieczyszczenie ścianek przestrzeni wodnej skraplacza. Praca sprężarki w wyższych temperaturach (>85 °C) oraz osiągnięcie na kolektorze tłoczonym temperatury powyżej 85 °C praktycznie nie jest możliwe ze względu na działanie zabezpieczeń.

Gdy temperatura kolektora tłoczego jest 60–70 °C (co odpowiada ciśnieniu sprężania 15–16 bar), wówczas mamy do czynienia ze zbyt małą ilością czynnika chłodniczego w stosunku do ilości wymaganej. Może to świadczyć o nieszczelności obiegu czynnika chłodniczego w chłodziarce. W przypadku ewentualnych nieszczelności w obiegu czynnika chłodniczego (w wysokociśnieniowej części obiegu termodynamicznego) w miejscach nieszczelności następuje rozprężenie czynnika chłodniczego i na termogramach występuje punktowe obniżenie temperatury badanego elementu (np. skraplacza) w sąsiedztwie nieszczelności przejawiające się wystąpieniem ciemniejszych kolorów.

W czasie poprawnej pracy chłodziarki minimalna temperatura kolektora ssawnego wynosi 6–8 °C. W stanach awaryjnych temperatura kolektora ssawnego może być niższa. Obniżenie temperatury na kolektorze ssawnym sprężarki może być spowodowane zmniejszeniem wydajności parownika (np. przez zmniejszenie ilości powietrza przepływającego przez parownik lub zanieczyszczenie zewnętrznej powierzchni parownika), które prowadzi do nie odparowania lub zmniejszenia temperatury przegrzania par czynnika gazowego i pogorszenia sprawności chłodziarki. Obniżenie temperatury przegrzania par w parowniku zagraża zassaniem ciekłego czynnika przez sprężarkę i może spowodować uszkodzenie płytek ssawnych lub zniszczenie sprężarki.

Wzrost temperatury na kolektorze ssawnym może być spowodowany ubytkiem czynnika chłodniczego w obiegu termodynamicznym, co wywołuje zwiększenie temperatury przegrzania par. Analogicznie wzrost temperatury skraplania czynnika chłodniczego w skraplaczu jest spowodowany zmniejszeniem przepływu wody lub zbyt wysoką temperaturą wody wlotowej do skraplacza.

Skraplacz

W badanych urządzeniach chłodniczych o działaniu bezpośrednim są stosowane skraplacze płaszczowo-rurowe będące przeponowymi wymiennikami ciepła przeznaczonymi do skraplania par czynnika chłodniczego. Skraplacz płaszczowo-rurowy jest zbudowany z płaszczą z przyspawanymi z obu końców dnami sitowymi, do których zamocowane są rurki tworzące powierzchnię wymiany ciepła. Woda chłodząca przepływa w rurkach, natomiast czynnik chłodniczy skrapla się w przestrzeni międzyrurowej na ich zewnętrznej powierzchni. Skraplacze wyposażone są w króćce dopływowe i odpływowe wody. Stosuje się w nich rury miedziane z żebrami nawalcowanymi na zewnętrznej powierzchni. Przy wzroście zanieczyszczenia powierzchni wymiany ciepła od strony wodnej zmniejsza się współczynnik przenikania ciepła, co jest przyczyną wzrostu ciśnienia i temperatury skraplacza. Powoduje to zmniejszenie wydajności chłodniczej, zwiększenie zużycia energii. W wysokiej temperaturze wody chłodzącej w granicznych warunkach następuje wyłączenie urządzenia. Dlatego też należy dbać o jakość wody chłodzącej oraz regularne czyszczenie powierzchni skraplacza. Zanieczyszczenie powierzchni skraplacza jest najczęstszym powodem zakłóceń pracy urządzeń chłodniczych. Ważne jest także utrzymywanie odpowiedniego (obliczeniowego) strumienia wody chłodzącej. Zbyt niski przepływ wody powoduje zmniejszenie skuteczności działania skraplacza i wydajności chłodziarki.

Rozkład temperatury w skraplaczu jest uzależniony od jego konstrukcji. W urządzeniach DV-290 stosuje się podwójne skraplacze z dwoma lub trzema wlotami czynnika chłodniczego. W urządzeniach TS zainstalowany jest jeden skraplacz. W zależności od mocy urządzenia chłodniczego stosowane są – skraplacze typu SK-TS-380 w chłodziarkach TS-300/1, a w chłodziarkach TS-350/1 – skraplacze typu SK-TS-440.

Układ chłodzenia skraplacza może być zamknięty lub otwarty. W przypadku układu zamkniętego temperatura wody na wlocie do skraplacza nie powinna przekraczać 32 °C, natomiast w przypadku układów otwartych temperatura ta jest zwykle niższa i wynosi około 26–28 °C. Istotne jest, aby różnica temperatury wody wlotowej i wylotowej ze skraplacza nie była mniejsza niż $\Delta t = 6$ °C (rys. 15.4). Gdy przy tym samym przepływie wody nastąpi zmniejszenie tej różnicy, a co za tym idzie obniżenie temperatury wody na wylocie ze skraplacza (np. poniżej 38 °C), wskazuje to na ograniczenie skuteczności wymiany ciepła między czynnikiem chłodniczym a wodą, np. na skutek zanieczyszczenia skraplacza. Wówczas układ zmniejsza swoją wydajność. Rozkład temperatury w płaszczyźnie pionowej skraplacza może świadczyć o poziomie napełnienia układu czynnikiem chłodniczym.

Filtr osuszająco-czyszczący

Podczas montażu orurowania obiegu termodynamicznego, a zwłaszcza prac spawalniczych lub nieprawidłowego zabezpieczenia chłodziarki podczas przebudów do obiegu czynnika chłodniczego mogą dostać się zanieczyszczenia mechaniczne, które mogą być przyczyną uszkodzenia sprężarki, zaworów lub urządzeń automatycznej

regulacji. W związku z tym instaluje się w obiegu czynnika chłodniczego filtr ADKS Plus z dwoma wkładami ceramicznymi typu H48 w celu wychwycenia zanieczyszczeń mechanicznych i absorpcji wilgoci z obiegu czynnika chłodniczego (rys. 15.5).

W normalnych warunkach pracy chłodziarki różnica temperatury ciekłego czynnika na wlocie do filtra i na wylocie z filtra powinna być jak najmniejsza (nie powinna przekraczać 2 °C). Wystąpienie większej różnicy temperatury świadczy o zanieczyszczeniu wkładów filtracyjnych (rys. 15.6).

Termostatyczny zawór rozprężny

Termostatyczne zawory rozprężne służą do dławienia ciekłego czynnika chłodniczego od ciśnienia skraplania do ciśnienia parowania. Zawory te regulują strumień ciekłego czynnika chłodniczego dopływającego do parownika w zależności od ciśnienia parowania i przegrzania oraz chwilowego obciążenia cieplnego. Gdy obciążenie cieplne wzrasta, przegrzanie staje się większe, zawór otwiera się w większym stopniu i do parownika dopływa większy strumień czynnika chłodniczego. Różnica temperatury przed i za zaworem rozprężnym (tj. między temperaturą parowania a temperaturą na ssaniu) nie powinna być mniejsza niż 35 °C. Gdy ta różnica jest mniejsza, wówczas maleje sprawność całego układu (rys. 15.7).

Parownik

Parowniki są to przeponowe wymienniki ciepła, których zadaniem jest odbieranie energii cieplnej z chłodzonego ośrodka na skutek parowania (wrzenia) czynnika chłodniczego [18, 61]. O intensywności wymiany ciepła podczas wrzenia decyduje udział energii przejmowanej z powierzchni parownika przez fazę ciekłą, gdyż wartość przejmowania ciepła tej fazy jest większa niż dla fazy gazowej. Dlatego też po stronie wrzącego czynnika należy zapewnić takie warunki, aby nastąpił pęcherzykowy charakter wrzenia umożliwiający intensywny odpływ tworzących się pęcherzyków pary. Aby stworzyć wymagane warunki wymiany ciepła, w parowniku należy nie dopuścić do wrzenia błonkowego [18, 61]. Należy także dążyć do uzyskiwania dużych gęstości strumienia cieplnego przenikającego przez ścianki powierzchni wymiany ciepła, co sprzyja burzliwemu przebiegowi procesu wrzenia.

Gęstość strumienia cieplnego jest zależna od warunków przejmowania ciepła po stronie czynnika chłodzonego. Intensywność wymiany ciepła jest zależna od oporów cieplnych ścianek, co uzależnione jest w głównej mierze od czystości powierzchni po obu stronach ścianki. Okazuje się, że po stronie czynnika chłodniczego duży ujemny wpływ na wymianę ciepła wywierają zanieczyszczenia powierzchni ścianek olejem, co wskazuje na potrzebę starannego odolejania ciekłego czynnika. Zanieczyszczenia po stronie czynnika chłodzonego, to najczęściej warstwy osadów lub produktów korozji tej powierzchni. W zależności od konstrukcji parowniki dzieli się na: parowniki rurowe (bezpośredniego działania) i płaszczowo-rurowe (pośredniego działania) [18].

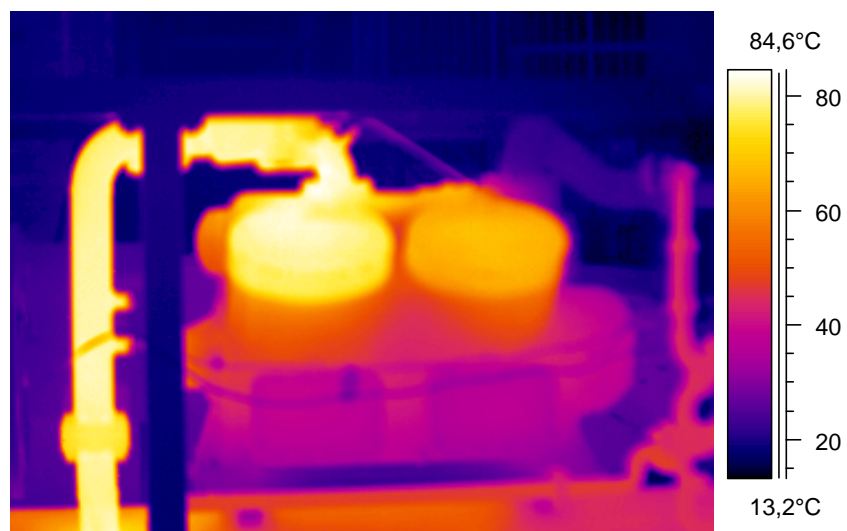
W parownikach rurowych czynnik chłodniczy odparowuje w rurach wykonanych z miedzi. Czynnik chłodniczy rozprężony w zaworze rozprężnym przepływa przez rury parownika jako mieszanina pary i cieczy, przy czym w końcowej części rur następuje całkowite odparowanie cieczy i przegrzanie pary.

W parownikach płaszczowo-rurowych czynnik chłodniczy odparowuje wewnątrz rurek, a schłodzona woda przepływa w przestrzeni międzyrurowej.

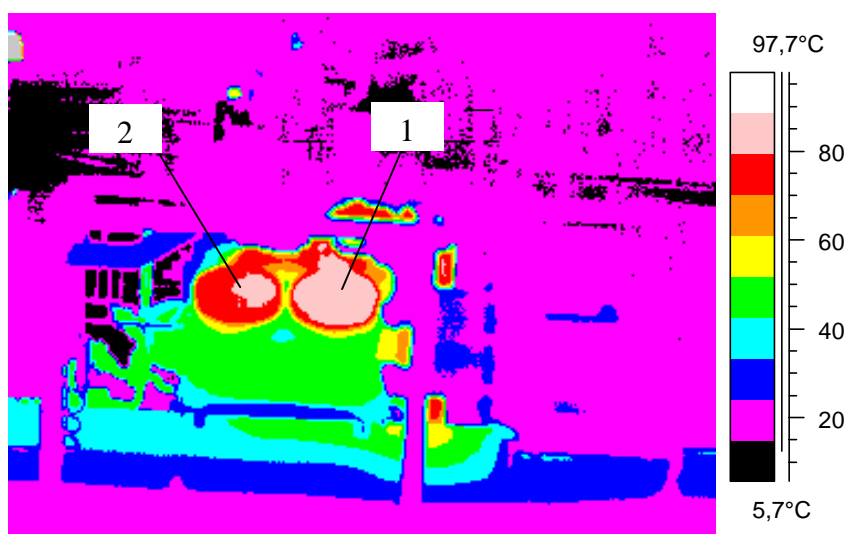
W systemach klimatyzacyjnych o bezpośrednim działaniu parownik stanowi przeponową chłodnicę powietrza. Chłodnicę przeponową (powierzchniową) stanowi zespół równolegle ułożonych rurek miedzianych w kształcie węzownic. Rurki tych chłodnic wykonywane są z miedzi, mosiądzu, aluminium lub stali [18].

W chłodnicy powietrza o działaniu bezpośrednim kierunki przepływu chłodzonego powietrza i czynnika chłodniczego powinny być przeciwne, aby zachować prawidłową wymianę ciepła. W przeciwnym razie mogą wystąpić wahania mocy chłodniczej parownika. Dopuszczalne zmiany temperatury wrzenia w parowniku nie powinny przekraczać od 4 do 5 °C [18]. W czasie zmniejszenia masy czynnika chłodniczego na skutek spadku jego dopływu może nastąpić jego przegrzanie, z czym wiążą się niekorzystne wartości współczynników przejmowania ciepła. Przy prawidłowej pracy parownika pośredniego działania temperatura czynnika chłodniczego w kolektorze wlotowym powinna wynosić od 3 do 4 °C, a w kolektorze wylotowym od 6 do 7 °C. Jeśli temperatura czynnika chłodniczego w kolektorze wylotowym przekracza wymienioną wartość oznacza to, że nastąpił spadek dopływu czynnika chłodniczego do parownika (rys. 15.8). W przypadku występowania temperatury czynnika chłodniczego w kolektorze wylotowym niższej od 6 °C można wnioskować o zanieczyszczeniu parownika.

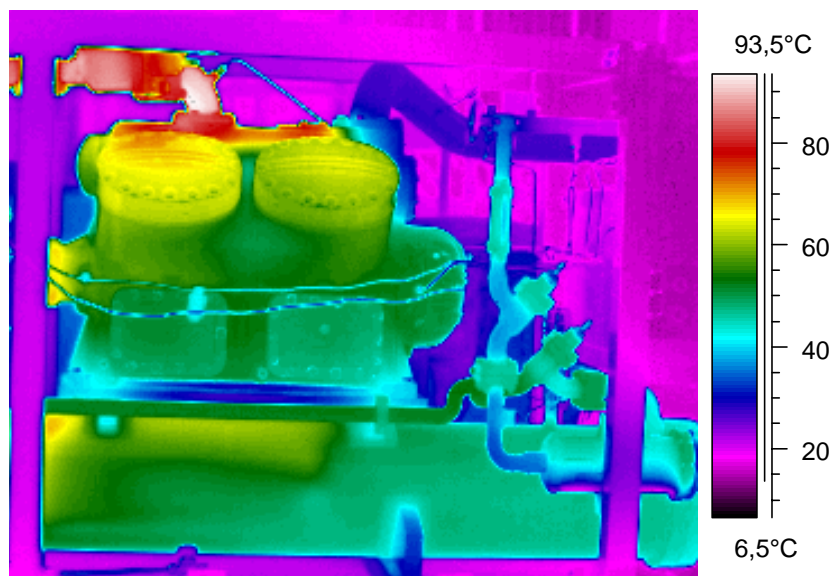
Przedstawione w niniejszej monografii sposoby oceny urządzeń chłodniczych na podstawie badań termowizyjnych umożliwiają bezinwazyjną diagnostykę funkcjonowania poszczególnych elementów chłodziarek, przy czym możliwa jest wizualna ocena rozkładu temperatury w tych elementach. Pozwala to na szybkie wykrycie ewentualnych usterek oraz podjęcie działań zaradczych, mogących polegać m.in. na wzmożonej konserwacji, drobnych naprawach itp.



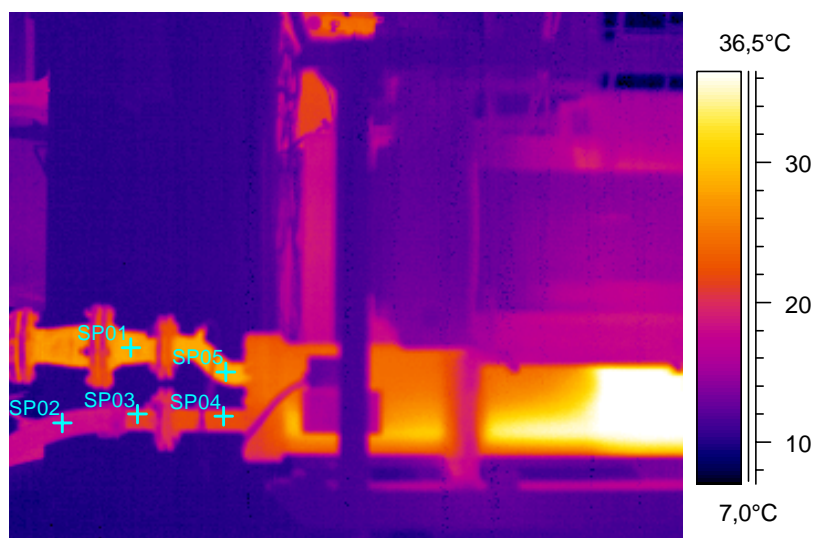
Rys. 15.1. Termogram sprężarki Carrier 5H86 przy prawidłowej pracy chłodziarki TS-300/1



Rys. 15.2. Termogram sprężarki Carrier 5H86 w chłodziarce TS-300:
 1 – praca dwóch tłoków, 2 – praca jednego tłoka



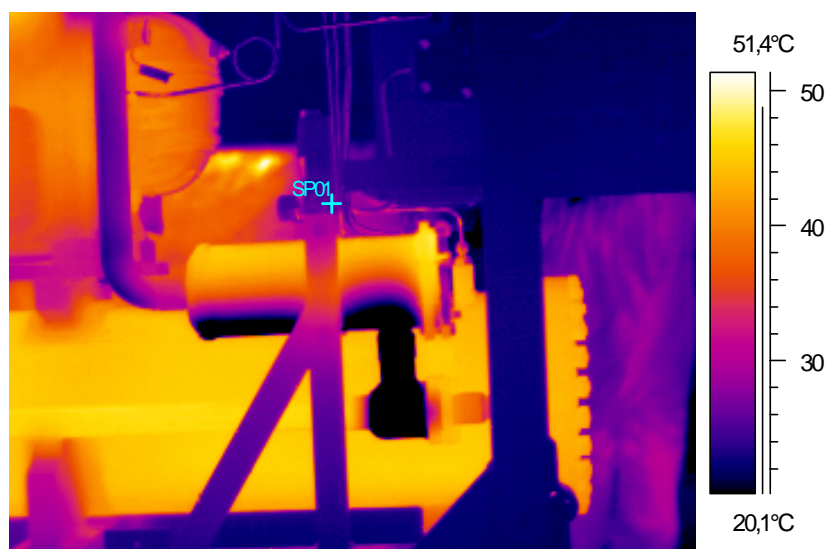
Rys. 15.3. Termogram sprężarki Carrier 5H86 w chłodziarce TS-300/1:
zmniejszona wydajność sprężarki



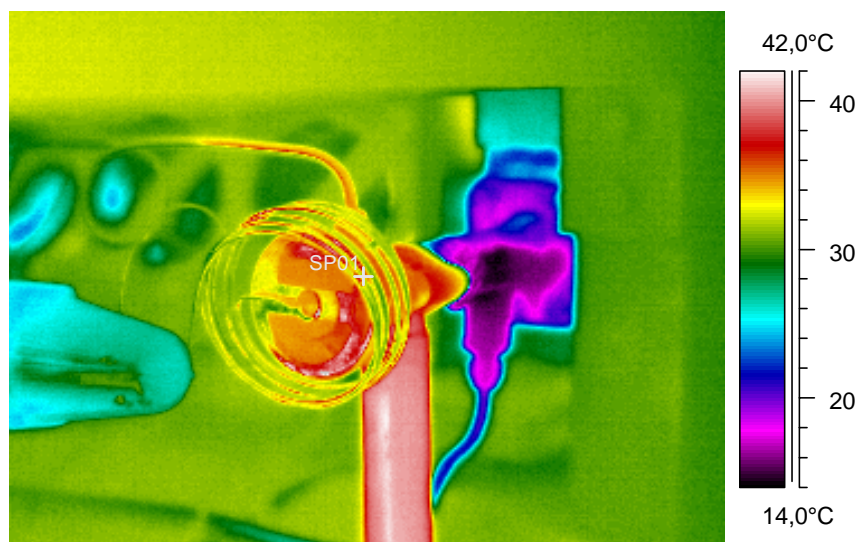
Rys. 15.4. Wlot i wylot ze skraplacza w chłodziarce TS-300/1



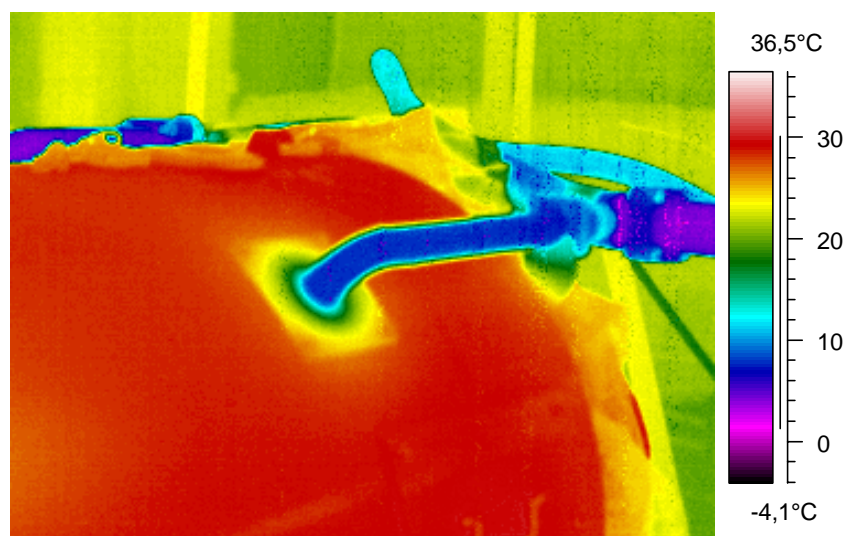
Rys. 15.5. Obraz termalny filtra w chłodziarce TS-350/1



Rys.15.6. Zanieczyszczony filtr w chłodziarce TS-300/1



Rys. 15.7. Zawór rozprężny w chłodziarce TS-350/1

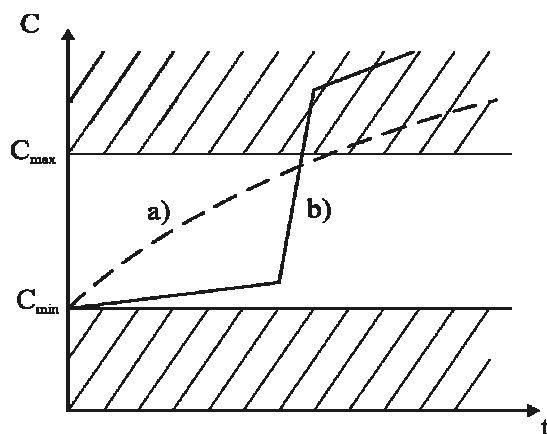


Rys. 15.8. Kolektor wlotowy i wylotowy z parownika w chłodziarce DV-290

16. Prognozowanie stanu technicznego chłodziarek powietrza kopalnianego

W wyniku oddziaływania środowiska w warunkach (dołowych) kopalń podziemnych, jak również realizacji przez urządzenia chłodnicze stawianych im zadań, początkowe właściwości chłodziarek powietrza kopalnianego ulegają zmianie. Odzwierciedleniem tego są zmiany wartości początkowych określonych cech mierzalnych oraz niemierzalnych [63].

W sensie ogólnym uszkodzenie obiektu technicznego polega na tym, że co najmniej jedna z mierzalnych lub niemierzalnych cech obiektu przestaje spełniać stawiane jej wymagania. Każdy obiekt techniczny można scharakteryzować za pomocą zbioru cech mierzalnych C_i^m , $i = 1, 2, \dots, n$, do których można zaliczyć np. temperaturę jego elementów. Okazuje się, że każde przejście określonej cechy $\zeta(t)$ poza ustalone granice C_{\min} , C_{\max} , można zaklasyfikować jako pogorszenie jakości elementu lub też jego uszkodzenie (rys. 16.1).



Rys. 16.1. Przejście i -tej cechy obiektu ze stanu zdatności do stanu niezdatności:
a) stopniowe, b) nagłe

Rozróżnia się następujące rodzaje uszkodzeń elementów urządzeń technicznych [17, 34, 63]:

- uszkodzenie pozorne, zwane „przekłamaniem”, charakteryzujące się chwilowymi przejściami procesu poza granice tolerancji, przy czym przejściu temu nie towarzyszą procesy nieodwracalne wewnątrz elementu,
- uszkodzenia stopniowe, uwarunkowane gromadzeniem się w elemencie skutków procesów nieodwracalnych, spowodowanych uprzednim przejściem określonej cechy $\zeta(t)$ poza granice tolerancji, które stopniowo powodują stałe przejście poza granice tolerancji,
- uszkodzenie natychmiastowe, spowodowane nieodwracalnymi szybko przebiegającymi zjawiskami podczas pierwszego lub też dowolnego, kolejnego przejścia cechy $\zeta(t)$ poza przedział tolerancji.

Praktykowane dotychczas, w niektórych kopalniach, sposoby eksploatacji maszyn polegające na ich naprawach w miejscu pracy po nagłym uszkodzeniu (awarii) są nie do przyjęcia we współczesnym górnictwie [34, 63].

Zagadnienie kontroli stanu zdadności i wykrywania uszkodzeń jest obecnie jednym z podstawowych celów określania niezawodności maszyn.

Szczególłą wagę przywiązuje się coraz częściej do diagnostyki pracy maszyn górniczych umożliwiającej wyprzedzające wykrycie zbliżającego się uszkodzenia w celu zaprogramowanego wyłączenia maszyny z eksploatacji lub jej naprawy.

W termowizyjnych badaniach diagnostycznych obiektów technicznych wykorzystuje się informacje zawarte w sygnałach cieplnych emitowanych z powierzchni tych obiektów (rozdział 12). Źródłami ciepła zmieniającymi ich stany termiczne są podzespoły, w których następuje niepożądane przetwarzanie energii mechanicznej i elektrycznej w energię cieplną. Źródła te mogą być przyczyną zmiany cech użytkowych obiektu. Jeśli przemiany cieplne wynikają z niesprawności elementów lub podzespołów, to w rezultacie może to prowadzić do awarii obiektu [16, 35].

W diagnostyce termowizyjnej obrazy termalne urządzeń chłodniczych są wyznaczone na podstawie badań (funkcjonujących) obiektów na stanowisku badawczym oraz w warunkach dołowych kopalń węgla i rud miedzi.

Termowizyjnymi badaniami diagnostycznymi są obejmowane całe obiekty (chłodziarki) oraz podstawowe ich elementy. W pierwszej kolejności termowizyjnymi badaniami muszą być objęte nowe chłodziarki wprowadzane do ruchu w kopalniach. Badania te powinny być realizowane na stanowisku badawczym, np. w firmie Termospec w Żorach. Celem tych badań ma być określenie wartości odniesienia średnich temperatur dla chłodziarek określonych typów oraz ich zasadniczych elementów.

Na podstawie badań nowych chłodziarek powietrza kopalnianego na stanowisku badawczym powinny być określone nominalne średnie temperatury całego badanego obiektu oraz wyróżnionych elementów (rozdz. 15).

Po wykonaniu badań powierzchniowych i zainstalowaniu chłodziarek w podziemiach kopalń po upływie określonego czasu, np. 6–12 miesięcy, muszą być powtó-

rzony badania termowizyjne chłodziarek i na podstawie uzyskanych termogramów należy wyznaczyć średnie wartości temperatur T_m odpowiednich elementów oraz całego obiektu [26, 54].

Zmiany czasowe wymienionych temperatur mogą być wyznaczone za pomocą równania różniczkowego [54]

$$\frac{dT_m}{d\tau} = K T_m \quad (16.1)$$

dla warunku początkowego

$$\tau = 0, T_m = T_{mn} \quad (16.2)$$

oraz warunku dodatkowego

$$\tau = \tau_1 > 0, T_m(\tau_1) > T_{mn}. \quad (16.3)$$

Po scałkowaniu równania (16.1) uzyskuje się

$$T_m(\tau) = C \exp(K\tau) \quad (16.4)$$

Stałą całkowania C wyznacza się z warunku początkowego, przy czym dla $\tau = 0$ uzyskuje się $T_m(0) = T_{mn}$ oraz $C = T_{mn}$. Równanie (16.4) przybiera postać

$$T_m(\tau) = T_{mn} \exp(K\tau) \quad (16.5)$$

Stałą K określa się z zależności (16.5) i warunku dodatkowego (16.3), uzyskując przy tym

$$K = \frac{\ln T_m(\tau_1) - \ln(T_{mn})}{\tau_1} \quad (16.6)$$

Ostatecznie więc równanie ujmujące zależność zmian czasowych temperatury średniej wybranych elementów chłodziarki lub całego urządzenia chłodniczego może być przedstawione w postaci

$$T_m(\tau) = T_{mn} \exp\left[\frac{\tau}{\tau_1} [\ln T_m(\tau_1) - \ln T_{mn}]\right]. \quad (16.7)$$

Wzór (16.7) odnosi się do sytuacji, w której w miarę zużywania się urządzenia lub jego elementów wzrasta średnia temperatura, tzn. gdy $T_m(\tau) > T_{mn}$. Jeśli natomiast zużywanie się elementów urządzenia prowadzi do obniżenia się ich średniej temperatury, to należy korzystać z równania różniczkowego

$$\frac{dT_m}{d\tau} = -K T_m, \quad (16.8)$$

które ma ogólne rozwiązanie w postaci

$$T_m(\tau) = C \exp(-K\tau). \quad (16.9)$$

Po wprowadzeniu warunku początkowego dla $\tau = 0$, $T_m(0) = T_{mn}$, $C = T_{mn}$ oraz warunku dodatkowego

$$\tau = \tau_1 > 0, T_m(\tau_1) < T_{mn} \quad (16.10)$$

uzyskuje się następujące rozwiązanie szczegółowe

$$T_m(\tau) = T_{mn} \exp\left[\frac{\tau}{\tau_1} [\ln T_{mn} - \ln T_m(\tau_1)]\right]. \quad (16.11)$$

Równanie (16.11) uzyskano z zależności (16.9) po wprowadzeniu wartości stałej $C = T_{mn}$ oraz współczynnika proporcjonalności wyznaczonego ze wzoru

$$K = \frac{\ln T_{mn} - \ln T(\tau_1)}{\tau_1}. \quad (16.12)$$

Jeśli znane są równania (16.7) lub (16.12) dla wyróżnionych elementów chłodziarek, to można prognozować przebieg zmian temperatury tych elementów w miarę ich starzenia się. Dla prognostycznego określenia czasu, w którym może dojść do awarii chłodziarki powietrza kopalnianego, dla każdego urządzenia chłodniczego ustala się przedziały wartości dopuszczalnych, których przekroczenie może wywołać awarię. Wartości te mogą być ustalone w wyniku prowadzonych badań, przy czym wstępnie przyjmuje się, że odchylenia nie powinny przekraczać $\pm 10\%$ średniej nominalnej temperatury T_{mn} (rys. 16.1). Mając to na uwadze oraz korzystając ze wzorów (16.7) i (16.11), możliwe jest określenie prognozowanego czasu, w którym może dojść do awarii chłodziarki [54].

Jeśli przez $T_{m\max}$ oznaczy się temperaturę dopuszczalną, po przekroczeniu której może nastąpić awaria, to według wzoru (16.7) można wyznaczyć czas τ_{\max} osiągnięcia tej temperatury przez pracującą chłodziarkę, a mianowicie

$$\tau_{\max} = \tau_1 \frac{\ln T_{m\max} - \ln T_{mn}}{\ln T_m(\tau_1) - \ln T_{mn}}. \quad (16.13)$$

Jeśli mamy do czynienia z obniżającą się temperaturą średnią elementu urządzenia do $T_{m\min}$, to wychodząc ze wzoru (16.11), uzyskujemy związek

$$\tau_{\max} = \tau_1 \frac{\ln T_{mn} - \ln T_{m\min}}{\ln T_{mn} - \ln T(\tau_1)} \quad (16.14)$$

Bezpieczny czas pracy chłodziarki τ_{bez} lub określonych jej elementów przy dopuszczonym δ procentowym odchyleniu temperatury średniej od temperatury nominalnej T_{mn} , tj. dla

$$T_{m \max} = T_{mn} (1 + 0,01\delta) \quad (16.15)$$

oraz

$$T_{m \min} = T_{mn} (1 - 0,01\delta) \quad (16.16)$$

powinien spełniać nierówność

$$\tau_{bez} < \tau_{\max} \cdot \quad (16.17)$$

Wzory od (16.1) do (16.17) dotyczą możliwości wystąpienia awarii w wyniku stopniowego uszkodzenia się chłodziarki lub jej elementów. Są one uwarunkowane gromadzeniem się w poszczególnych elementach skutków procesów nieodwracalnych spowodowanych, uprzednimi przejściami procesu pracy poza granice tolerancji, które stopniowo powodują stałe przejście poza te granice.

W praktyce górniczej zdarzają się również natychmiastowe uszkodzenia chłodziarek powietrza kopalnianego, spowodowane nieodwracalnymi szybko przebiegającymi zjawiskami podczas pierwszego lub też dowolnie następnego przejścia procesu poza przedział tolerancji.

Niniejsza praca nie dotyczy jednak takich sytuacji.

W badaniach termalnych w podczerwieni urządzeń chłodniczych powietrza kopalnianego, jak to już wspomniano, są wykorzystane termogramy rejestrowane w różnych okresach pracy chłodziarek. Na podstawie tych zobrazowań możliwa jest ocena jakości pracy całego urządzenia, jak również jego elementów.

Jakość tej pracy wstępnie można oceniać na podstawie wskaźnika α określonego wzorem [54]:

- podczas wzrostu temperatury średniej

$$\alpha = \frac{T_{mn}}{T_m(\tau)} \quad (16.18)$$

- podczas obniżenia się temperatury średniej

$$\alpha = \frac{T_m(\tau)}{T_{mn}} \quad (16.19)$$

Arbitralnie można przyjmować następujące kryteria jakości pracy:

- praca prawidłowa

$$\alpha = 1 \pm 0,95, \quad (16.20)$$

- praca zadowolająca

$$\alpha = 0,94 \pm 0,90, \quad (16.21)$$

- praca dopuszczona pod warunkiem wzmożonej kontroli

$$\alpha = 0,89 \div 0,85, \quad (16.22)$$

- urządzenie (element) wymaga przeglądu i zabiegów konserwacyjnych

$$\alpha = 0,84 \div 0,80, \quad (16.23)$$

- urządzenie (element) wymaga remontu

$$\alpha = 0,79 \div 0,70, \quad (16.24)$$

- urządzenie (element) uszkodzony

$$\alpha < 0,70. \quad (16.25)$$

Podkreśla się, że wymienione kryteria muszą być zweryfikowane podczas badań różnych typów chłodziarek na stanowisku badawczym oraz w podziemiach kopalń węgla i rud miedzi.

Podsumowując, można stwierdzić, że istota diagnostyki technicznej polega na określeniu stanu maszyny w sposób pośredni, bez jej demontażu, na podstawie pomiaru generowanych sygnałów diagnostycznych i porównaniu ich z wartościami nominalnymi.

W diagnostyce obrazowo-termalnej (termowizyjnej) chłodziarek powietrza kopalnianego wykorzystuje się informacje zawarte w sygnałach cieplnych emitowanych z powierzchni poszczególnych elementów badanego urządzenia. Sygnały te są przetwarzane w kamerze termowizyjnej na obrazy termalne (termogramy), które umożliwiają wykrycie niepożądanych zmian termicznych w badanych obiektach. Na podstawie tych badań możliwa jest prognostyczna ocena czasu bezawaryjnego działania poszczególnych głównych elementów chłodziarki powietrza kopalnianego. Diagnostyka obrazowo-termalna umożliwia prognozowanie uszkodzeń zużyciowych będących wynikiem nieodwracalnych zmian właściwości początkowych elementów chłodziarek, zachodzących podczas eksploatacji na skutek procesów starzenia się i zużywania.

17. Techniczne, organizacyjne i ekonomiczne aspekty stosowania chłodziarek powietrza kopalnianego

Duża liczba eksploatowanych lokalnych chłodziarek powietrza kopalnianego w górnictwie węglowym i rud miedzi stwarza wiele problemów natury technicznej i organizacyjnej.

Jak się okazuje, na podstawie protokołów z czynności serwisowych, gwarancyjnych i pogwarancyjnych firmy Termospec w Żorach, dla ponad 100 zbadanych lokalnych chłodziarek typu TS, LKM i DV-290, najczęściej w tych chłodziarkach ulegają uszkodzeniom: sprężarki, skraplacze płaszczowo-rurowe, urządzenia wyposażenia elektrycznego oraz często występują zanieczyszczenia osadami przestrzeni wodnej skraplaczy. Główne przyczyny uszkodzenia sprężarek to: zassanie ciekłego czynnika chłodniczego i brak smarowania wału korbowego. Z winy użytkowników chłodziarek najczęściej rejestruje się uszkodzenia płytek ssących w sprężarkach, uszkodzenia (mechaniczne) kapilar zaworów rozprężnych oraz aparatury elektrycznej i zabezpieczającej.

Uszkodzenia sprężarek powstają zwykle na skutek niewłaściwej obsługi, a zwłaszcza nieprzestrzegania zasad uruchamiania parownika przed uruchomieniem sprężarki.

Dość często dochodzi do rozszczelnienia przestrzeni wodnej skraplaczy wskutek działania związków chloru i siarki w warunkach podwyższonej temperatury do około 40 °C i ciśnienia do 40 bar. Należy podkreślić, że rozszczelnienie skraplacza pod niskim ciśnieniem wody w obiegu chłodzenia skraplacza powoduje ubytek czynnika chłodniczego lub przedostanie się wody do obiegu czynnika chłodniczego. Wtórny efekt przedostania się wody do obiegu czynnika chłodniczego jest uszkodzenie sprężarki oraz parownika.

Uszkodzeń elementów kopalnianych urządzeń chłodniczych w wielu przypadkach można uniknąć, jeśli przestrzega się określonych zasad, a zwłaszcza: właściwego montażu chłodziarki i jej uruchamiania nadzorowanego przez serwis producenta, bieżącą i okresową kontrolę stanu technicznego chłodziarek przez wykwalifikowane i odpowiednio przeszkolone służby kopalniane, prowadzenie rejestracji parametrów pracy urządzeń chłodniczych przez służby kopalniane, profilaktyczne działania serwisu w okresie gwarancji, wymianę filtrów czynnika chłodniczego i oleju w sprężarkach, a także stosowanie filtracji i usuwanie osadów (zmiękczenie) wody chłodzącej skraplacz.

Prawidłowa gospodarka podziemnymi chłodziarkami powietrza kopalnianego wymaga określonych działań organizacyjnych i technicznych. Do głównych działań organizacyjnych zalicza się: szkolenie załóg zajmujących się obsługą maszyn klimatyzacyjnych, przy czym konieczne jest organizowanie w kopalniach, stosujących urządzenia chłodnicze, jednostek zajmujących się wyłącznie klimatyzacją robót górniczych, które powinny podlegać kompetentnej osobie kierownictwa kopalni.

W zakresie działań technicznych należy przestrzegać: zasad ujętych w instrukcjach dotyczących montażu, przebudowy i uruchamiania chłodziarek, badań okresowych funkcjonalności i skuteczności działania zabezpieczeń ciśnieniowych i temperaturowych ze szczególnym uwzględnieniem badań termowizyjnych, a także prowadzenie badań diagnostycznych drgań i wibracji generowanych przez maszyny klimatyzacyjne.

Stały wzrost głębokości eksploatacji kopalni użytecznych leży u podstaw ciągłego rozwoju sposobów klimatyzowania podziemnych wyrobisk górniczych. Obserwuje się tendencję rozwijania klimatyzacji grupowej, w której znajdują zastosowanie agregaty chłodnicze o mocy 1–2 MW oraz klimatyzacji kompaktowej z agregatami chłodniczymi o mocach poniżej 0,5 MW zlokalizowanymi w podziemiach kopalni w pobliżu szybów. Ochładzanie powietrza w tym przypadku odbywa się wodnymi przeponowymi chłodnicami powietrza w chodnikach lub małogabarytowymi chłodnicami umieszczonymi na froncie eksploatacyjnym (np. w ścianach).

Rozwijana jest także klimatyzacja centralna z agregatami chłodniczymi umiejscowionymi na powierzchni kopalni. W tym systemie klimatyzacji znajdują zastosowanie wodne przeponowe chłodnice powietrza w chodnikach i małogabarytowe chłodnice w ścianach.

Przewiduje się także dalsze stosowanie lokalnych chłodziarek powietrza kopalnianego w miejscach odległych, gdzie występują wysokie koszty doprowadzania rurociągami zimnej wody do miejsc ochładzania powietrza.

Istotnym czynnikiem w rozważaniach dotyczących ochładzania powietrza kopalnianego są koszty zakupu chłodziarek i koszty ich eksploatacji. Koszt zakupu lokalnej chłodziarki powietrza kopalnianego w zależności od typu urządzenia w 2005 roku wahał się w granicach od 380 000 zł (TS-300/1 o mocy 300 kW) do 460 000 zł (DV-350 o mocy 350 kW). W cenie tej ujęte były: chłodziarka z parownikiem (chłodnicą powietrza) i chłodnicą wyparną wody. W zakres cen nie wchodziły: pompa obiegu chłodzenia skraplacza i zraszania chłodnicy wyparnej, zbiorniki wody i wyposażenie układu zasilania elektrycznego. Okazuje się, że zakup i montaż chłodziarki w kopalni, to zaledwie około 38% nakładów inwestycyjnych związanych z uruchomieniem urządzenia chłodniczego. Pozostałe nakłady wynoszące 62% to zakup i montaż: wentylatorów lutniowych do parownika i chłodnicy wyparnej, pomp wody zraszającej i chłodzącej skraplacza, instalacji zasilania i sterowania oraz sieci rurociągów wodnych.

W skład kosztów eksploatacji wchodzi: koszty zużycia energii elektrycznej przez silniki sprężarek, pomp i wentylatorów lutniowych, koszty robocizny, a także części zamiennych, serwisów i remontów. Ogółem w czasie pracy chłodziarki powietrza, np.

typu DV-290, zużywa się 1 205 667 kWh energii elektrycznej w ciągu roku. Wynika stąd, że roczny koszt zużycia energii elektrycznej przez jedno lokalne urządzenie chłodnicze wynosi około 362 000 zł.

W skład kosztów robocizny mającej na celu utrzymanie sprawności i niezawodnej pracy chłodziarki wchodzi m.in. wszelkie koszty kontroli, konserwacji, czyszczenia, przebudowy oraz czynności związanych z nadzorem i pomiarami. Koszty te w skali roku kształtują się na poziomie około 153 000 zł.

Rozważając problemy kosztów klimatyzowania podziemnych wyrobisk górniczych, warto zwrócić uwagę na problem kosztów chłodzenia skraplaczy lokalnych chłodziarek powietrza kopalnianego o działaniu bezpośrednim. Chłodzenie skraplacza w tych chłodziarkach może odbywać się dwoma sposobami, tj. za pomocą chłodnicy wyparnej, z której ciepło z obiegu wodnego skraplacza jest odprowadzane do zużytego powietrza kopalnianego (obieg zamknięty) lub ciepło to może być przekazywane do strumienia wody kopalnianej pobieranej z sieci rurociągów i kierowanej do systemu odwadniającego kopalnię (obieg otwarty).

W przypadku obiegu otwartego w jednej chłodziarce o mocy 300 kW zużywa się około 18 m³/h świeżej wody, co powoduje przeciętne zużycie wody przez jedną chłodziarkę około 108 000 m³ na rok. Przy koszcie wody wynoszącym 3,0 zł za 1 m³ daje to kwotę około 324 000 zł rocznie. Jeśli jest stosowany obieg zamknięty, koszty te są na ogół mniejsze o połowę.

Warto nadmienić, że podczas stosowania obiegów otwartych zdarzają się przypadki, w których ciepła woda z chłodzenia skraplacza jest kierowana do obiegu technologicznego, np. do zraszania urządzeń urabiających, transportowych itp., co bardzo niekorzystnie wpływa na warunki klimatyczne w danym rejonie i podważa sens klimatyzowania podziemnych wyrobisk górniczych.

Należy także wspomnieć, że w przypadku stosowania w kopalni urządzeń do ochładzania powietrza kopalnianego, podczas ewentualnego wypadnięcia ich z ruchu na skutek awarii, bywa konieczne skrócenie czasu pracy brygad zatrudnionych w przodkach robót przygotowawczych i eksploatacyjnych, co zwykle jest związane z poważnym ograniczeniem wydobywania kopalni i postępu zaplanowanych robót górniczych. Niezależnie od tego w warunkach awaryjnego wyłączenia z ruchu chłodziarek powietrza kopalnianego może wystąpić poważne zagrożenie zdrowia, a nawet życia załogi górniczej w skutek nadmiernego zagrożenia termicznego. Jeśli nawet zagrożenie termiczne nie stanowi poważnego niebezpieczeństwa dla ludzi zatrudnionych w podziemiach kopalni, to w podwyższonej temperaturze powietrza kopalnianego następuje znaczący spadek wydajności pracy załogi i jej bezpieczeństwa. Dlatego też w przypadku stosowania w kopalniach podziemnych urządzeń do sztucznego ochładzania powietrza, konieczne jest możliwie jak najpełniejsze zapewnienie niezawodności i ciągłości pracy tych urządzeń.

Dotychczasowe metody kontroli pracy chłodziarek powietrza kopalnianego nie eliminują awaryjnego wyłączenia ich z ruchu, gdyż na ogół nie pozwalają one na prognozowanie stanu technicznego tych urządzeń.

Opisane w niniejszej monografii bezinwazyjne badania elementów chłodziarek powietrza kopalnianego w podczerwieni z zastosowaniem kamer termowizyjnych oraz opracowana metoda prognozowania stanu technicznego oparta na tych badaniach, pozwala na pogłębioną kontrolę i ocenę aktualnego oraz przyszłego niezbyt odległego stanu badanych urządzeń chłodniczych. Opracowana w ramach projektu 4T12A03527 Ministerstwa Edukacji i Nauki baza obrazowa elementów chłodziarek bezpośredniego działania oraz opracowane zasady diagnozowania termowizyjnego tych chłodziarek, umożliwiają porównywanie określonych termogramów z obrazami termalnymi użytymi dla warunków nominalnych określonego typu chłodziarki.

Należy stwierdzić, że diagnozowanie termowizyjne stanu technicznego lokalnych chłodziarek powietrza kopalnianego o działaniu bezpośrednim ściśle wiąże się ze zwiększeniem bezpieczeństwa i efektywności klimatyzacji wyrobisk górniczych. Tak więc nowoczesne podejście do diagnozowania stanu technicznego chłodziarek powietrza kopalnianego oraz zastosowanie nowoczesnych urządzeń kontrolnych w tej diagnostyce, jakimi są kamery termowizyjne, umożliwi podniesienie na wyższy poziom techniki klimatyzacji wyrobisk górniczych w polskich kopalniach węgla i rud miedzi.

Literatura

- [1] ASHRAE 1994 Standard method for measurement of moist air properties. ANSI/ASHRAE Standard 41.6 – 1994.
- [2] Budryk W., *Wentylacja kopalń, cz. I, Przewietrzanie wyrobisk*, wyd. 2, Wydawnictwo Górniczo-Hutnicze, Katowice 1961.
- [3] Bystróż H., Jaroń S., Markefka P., Strumiński A., Wojtyczka A., *Przewietrzanie kopalń, Poradnik górnika*, t. III, dz. I, Wyd. Śląsk, Katowice, 1974.
- [4] Bystróż H., Knechtel J., Markefka P., *Przybliżony wskaźnik obciążenia termicznego górników w gorących miejscach pracy kopalń*, Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie, Kwartalnik WUG nr 4 (8) 1993.
- [5] Czapliński A., Henting H., *Urządzenia GFW do klimatyzacji kopalń*, Materiały Szkoły Eksploatacji Podziemnej 1997, Kraków 1997.
- [6] Dokumentacja techniczna stacji prób chłodziarek powietrza kopalnianego (praca niepublikowana).
- [7] Drenda J., *Dyskomfort cieplny w środowiskach pracy głębokich kopalń*, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Górnictwo z. 213, Gliwice 1993.
- [8] Gajosiński S., Turkiewicz W., *Technika klimatyzacji stanowiskowej w kopalniach KGHM Polska Miedz SA – stan obecny i rozwój*. Materiały 1 Szkoły Aerologii Górniczej, Sekcja Aerologii Górniczej Komitetu Górnictwa PAN, Zakopane, 11–15 październik 1999.
- [9] Guide to meteorological instruments and method of observation, Six ed., WMO – No. 8. Geneva 1996.
- [10] Gutowski K.M., *Chłodnictwo i klimatyzacja*, WNT, Warszawa 2003.
- [11] Jones W.P., *Klimatyzacja*, Wyd. Arkady, Warszawa 2001.
- [12] Kajewski B., *Termowizyjna metoda określania stanu technicznego maszyn i urządzeń*. Pierwsza Ogólnopolska Konferencja Termografii w Podczterwieni, 19–20 listopad 1992, Szczyrk.
- [13] Knechtel J., *Stan zagrożenia klimatycznego w polskich kopalniach węgla kamiennego, jego zmiany w ciągu ostatnich 20 lat i stosowna profilaktyka*. Materiały V Konferencji „Wybieranie złóż na dużych głębokościach oraz w trudnych warunkach geotermicznych”, Głębokie Złóżo 2005, Jugowice, 14–17 czerwca 2005.
- [14] Kostowski E., *Promieniowanie ciepłe*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1993.
- [15] Kostyro K., Łobzowski A., *Klimat, pomiary, regulacja*, Agencja Wydawnicza PAK, Warszawa 2002.
- [16] Kwaśny W., Poloszyk S., Różański L., *Termowizja w badaniach diagnostycznych maszyn technologicznych*, Przegląd Mechaniczny, 4/98.
- [17] Lipowczan A., *Perspektywy rozwoju bezdemontażowej diagnostyki maszyn górniczych*, Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, Nr 12 (305), grudzień 1995.
- [18] Łuska P., Nawrat S., *Klimatyzacja kopalń podziemnych – urządzenia chłodnicze*. Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej, Kraków 2002.
- [19] Łuska P., Nawrat S., *Stan i kierunki rozwoju klimatyzacji lokalnej w polskich kopalniach podziemnych*. Materiały 3 Szkoły Aerologii Górniczej, Sekcja Aerologii Górniczej Komitetu Górnictwa PAN, Zakopane, 12–15 października 2004.

- [20] Łuska P., Nawrat S., *Stan i perspektywy stosowania urządzeń chłodniczych pośredniego działania w kopalniach podziemnych*. V Konferencja „Wybieranie złóż na dużych głębokościach oraz w trudnych warunkach geotermicznych”, Głębokie Złoże 2005, Jugowice, 14–17 czerwca 2005.
- [21] Łuska P., Madeja-Strumińska B., *Stacja prób górniczych chłodziarek powietrza kopalnianego*, Cuprum 4, 2005.
- [22] Madeja-Strumińska B., Strumiński A., *Aerotermodynamika górnicza*, Wyd. Śląsk, Katowice 1998.
- [23] Madeja-Strumińska B., *Wyznaczanie temperatury pierwotnej skał metodą pomiaru natężenia promieniowania podczerwonego*, Cuprum nr 24/2002.
- [24] Madeja-Strumińska B., Śnieżek J., *Współczynniki emisyjności skał występujących w kopalniach LGOM*. Cuprum 1/2003.
- [25] Madeja-Strumińska B., Strumiński A., *Projektowanie naturalno-wymuszonych rozplywów powietrza w kopalniach podziemnych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2004.
- [26] Madeja-Strumińska B., *Diagnostyka obrazowo-termalna chłodziarek powietrza kopalnianego*. Centrum Elektryfikacji i Automatyzacji Górnictwa EMAG, Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa 12 (419), 2005.
- [27] Miękinia W., *Pomiary termowizyjne – przyrządy i metody*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2004.
- [28] Nawrat S., *Klimatyzacja w polskich kopalniach węgla kamiennego – stan i perspektywy*, IV Konferencja „Wybieranie złóż na dużych głębokościach oraz w trudnych warunkach geotermicznych”, Duszniki Zdrój, 25–28 czerwca 2002.
- [29] Niczyporuk Z., *Diagnostyka procesów i urządzeń górniczych, Inżynieria Diagnostyki Maszyn*, Biblioteka Problemów Eksploatacji, Polskie Towarzystwo Diagnostyki Technicznej, Instytut Technologii Eksploatacji RIB Radom, Warszawa, Bydgoszcz, Radom 2004.
- [30] Oracz J., Tamowski S., *Doświadczenie eksploatacyjne z systemem diagnozowania stanu eksploatacyjnego wentylatorów głównych w kopalni „Ziemowit”*, Przegląd Górniczy, Nr 12, 1997.
- [31] Pawiński J., Roszkowski J., Strzeziński J., *Przewietrzanie kopalń*, Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice 1995.
- [32] Pegowski P., *Efektywność termodiagnostyki w podczerwieni – uwarunkowania, stan trendy*. IV Konferencja Krajowa Termografia i Termometria w Podczerwieni, Ustroń–Jaszowiec, 4–6 listopada 2004.
- [33] Polakowski H., Pręgowski P., *Urządzenia teletermodekcyjne w podczerwieni – przegląd rozwiązań*. Pierwsza Ogólnokrajowa Konferencja Termografii i Termometrii w Podczerwieni, Szczyrk, 19–20 listopada 1992.
- [34] Poloszyk S., Różański L., *Termowizyjna diagnostyka maszyn technologicznych*, PAK 1/2000.
- [35] Poloszyk S., Różański L., *Obraz termowizyjny jako symptom w diagnostyce termalnej maszyn technologicznych*. Konferencja Termografia i Termowizja w Podczerwieni 2000, Łódź.
- [36] Praca zbiorowa: *Monografia KGHM Polska Miedź SA*, Lubin 1996.
- [37] Praca zbiorowa: *Warianty systemu klimatyzacji kopalń KGHM Polska Miedź SA oraz ekonomiczne aspekty ich zastosowania w robotach górniczych prowadzonych do głębokości 1250 m*, KGHM Polska Miedź SA, Departament Techniki i Technologii Górniczej, Lubin, luty 1999 (praca niepublikowana).
- [38] Praca zbiorowa pod redakcją A. Nowakowskiego: *Postępy termografii – aplikacje medyczne*, Gdańsk 2001.
- [39] Praca zbiorowa pod kierunkiem W. Konopko: *Raport roczny (2001) o stanie podstawowych zagrożeń naturalnych i technicznych w górnictwie węgla kamiennego*, Główny Instytut Górnictwa, Główne Centrum Bezpieczeństwa Górniczego, Katowice 2002.
- [40] Praca zbiorowa pod redakcją H. Madury: *Pomiary termowizyjne w praktyce*, Agenda Wydawnicza Paku, Warszawa, luty 2004.

- [41] Praca zbiorowa pod nadzorem J. Michałowskiego: *Raport o stanie bezpieczeństwa pracy i ochrony zdrowia w środowisku pracy Zakładów Górniczych KGHM Polska Miedź SA*, Wyd. CBPM Cuprum sp. z o.o. – Ośrodek Badawczo Rozwojowy, Wrocław 2004.
- [42] Praca zbiorowa pod kierunkiem W. Konopko: *Raport roczny (2004) o stanie podstawowych zagrożeń naturalnych i technicznych w górnictwie węgla kamiennego*, Główny Instytut Górnictwa, Główne Centrum Bezpieczeństwa Górniczego, Katowice 2005.
- [43] Pryszcz E., Bednorz J., *Badania eksperymentalne na stanowisku prób górnictwa urządzeń chłodniczych*, Termospec, Żory, październik 2005 (praca niepublikowana).
- [44] Roszczyński W., Trutwin W., Waclawik J., *Kopalniane pomiary wentylacyjne*, Wyd. Śląsk, Katowice 1992.
- [45] Roszczyński W., Nawrat S., Szlązak J., Tomczyk J., *Bezpieczna kopalnia – prawo, zagrożenia, zarządzanie*, Oficyna Wydawnicza TEXT, Kraków 1999.
- [46] Roszkowski J., Nowak B., Nawrat S., Holesz K., *Wykonanie stanowiska do przeprowadzania badań termodynamicznych i technicznych urządzeń chłodniczych*. Praca badawczo-rozwojowa AGH w ramach Projektu Celowego 6T120552001/5513, Kraków (praca niepublikowana).
- [47] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 28.06.2002 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy oraz prowadzenia ruchu i specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych.
- [48] Rudkowski G., *Termowizja i jej zastosowanie*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1978.
- [49] Sala A., *Radiacyjna wymiana ciepła*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1993.
- [50] Spioch F., *Wpływ mikroklimatu w kopalniach na zdrowie, wydajność i bezpieczeństwo pracy górników*, Chłodnictwo 8–9/1976.
- [51] Strumiński A., Madeja-Strumińska B., *Zastosowanie gradientów temperatury powietrza do prognozowania mikroklimatu w podziemnych wyrobiskach górniczych*, 9 Sesja Międzynarodowego Biura Termofizyki Górniczej, Gliwice, 18–22 września 2000, Politechnika Śląska, Instytut Eksploatacji Złóż.
- [52] Strumiński A., Madeja-Strumińska B., *Ruchowa metoda prognozowania warunków klimatycznych w kopalniach głębinowych*, Materiały 2 Szkoły Aerologii Górniczej, Sekcja Aerologii Górniczej Komitetu Górnictwa PAN, Zakopane, 7–11 października 2002.
- [53] Strumiński A., Madeja-Strumińska B., Gola S., Zagrzebski P., *Przeprowadzenie badań nad możliwością wykorzystania pirometrów i kamer termowizyjnych do oceny warunków wentylacyjno-klimatycznych w kopalniach rud miedzi*, Raport Politechniki Wrocławskiej, wrzesień 2002, Wrocław (praca niepublikowana).
- [54] Strumiński A., Madeja-Strumińska B., Łuska P., *Opracowanie metodyki badań termalnych w podczerwieni urządzeń chłodniczych wybranych typów*. Raport Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005 (praca niepublikowana).
- [55] Szlązak N., Tor A., Rzepki H., *Ocena efektywności pracy skojarzonego układu energetyczno-skojarzonego w KWK „Pniówek”*, Materiały 2 Szkoły Aerologii Górniczej, Sekcja Aerologii Górniczej Komitetu Górnictwa PAN, Zakopane, 7–11 października 2002.
- [56] Szlązak N., Tor A., Jakubów A., *Ocena funkcjonowania centralnej klimatyzacji w Kopalni Węgla Kamiennego „Pniówek”*, Materiały 2 Szkoły Aerologii Górniczej, Sekcja Aerologii Górniczej Komitetu Górnictwa PAN, Zakopane 7–11, października 2002.
- [57] Szlązak N., Tor A., Jakubów A., *Systemy klimatyzacji wyrobisk dołowych w kopalniach Jastrzębskiej Spółki węglowej SA*, Materiały V Konferencji „Wybieranie złóż na dużych głębokościach oraz w trudnych warunkach geotermicznych”, Głębokie Złoże 2005, Jugowice, 14–17 czerwca 2005.
- [58] Świtoń A., Skowrońska A., *Wpływ warunków klimatycznych złoża rud miedzi na wypadkowość*, Materiały V Konferencji „Wybieranie złóż na dużych głębokościach oraz w trudnych warunkach geotermicznych”, Głębokie Złoże 2005, Jugowice, 14–17 czerwca 2005.

- [59] Turkiewicz W., *Propozycja nowego wskaźnika oceny warunków klimatycznych w kopalniach Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego*, Cuprum 3–4, 1986.
- [60] Voss J., *Grubenklima*, Verlag Gluckauf, t. 27, Essen 1981.
- [61] Waclawik J., Cygankiewicz J., Knechtel J., *Warunki klimatyczne w kopalniach głębokich*, Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej, Kraków 1998.
- [62] Wróbel A., *Wykorzystanie termografii przy sporządzaniu bilansu cieplnego urządzeń przemysłowych*. Trzecia Ogólnopolska Konferencja Termografii i Termometrii w Podczerwieni, 27–29 listopada 1996, Warszawa.
- [63] Zakrzewski T., *Kontrola zdatności maszyn górniczych w oparciu o decyzyjne wskaźniki fenomenologiczno-doświadczalne*. *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa* 2/1987.
- [64] Żółtowski B., *Teoria i inżynieria diagnostyki technicznej*, Inżynieria Diagnostyki Maszyn, Biblioteka Problemów Eksploatacji, Polskie Towarzystwo Diagnostyki Technicznej, Instytut Technologii Eksploatacji RIB Radom, Warszawa, Bydgoszcz, Radom 2004.
- [65] Żółtowski B., *Uszkodzenia maszyn*, Inżynieria Diagnostyki Maszyn, Biblioteka Problemów Eksploatacji, Polskie Towarzystwo Diagnostyki Technicznej, Instytut Technologii Eksploatacji RIB Radom, Warszawa, Bydgoszcz, Radom 2004.
- [66] Żółtowski B., *Diagnostyka w życiu maszyn*, Inżynieria Diagnostyki Maszyn, Biblioteka Problemów Eksploatacji, Polskie Towarzystwo Diagnostyki Technicznej, Instytut Technologii Eksploatacji RIB Radom, Warszawa, Bydgoszcz, Radom 2004.
- [67] Żółtowski B., *Fizyka diagnostyki technicznej*, Inżynieria Diagnostyki Maszyn, Biblioteka Problemów Eksploatacji, Polskie Towarzystwo Diagnostyki Technicznej, Instytut Technologii Eksploatacji RIB Radom, Warszawa, Bydgoszcz, Radom 2004.