

Systemy klimatyzacji wyrobisk górniczych w polskich kopalniach

Air conditioning systems for mining excavations in polish coal mines



Prof. dr hab. inż. Nikodem Szlązak *) *Dr hab. inż. Dariusz Obracaj**) *Dr hab. Justyna Swolkień**)

Treść: W wyrobiskach podziemnych, którymi przepływa powietrze występują naturalne i technologiczne źródła dopływu strumienia ciepła. W wyniku tego notuje się w nich wysokie temperatury, co po uwzględnieniu równie wysokiej wilgotności powietrza, powoduje znaczne pogorszenie warunków klimatycznych. Skutkuje to pogorszeniem takich funkcji organizmu człowieka jak: zdolność percepcji, koncentracji, uwagi, spostrzegawczości. Ten niekorzystny wpływ temperatury i wilgotności na organizm ludzki określamy pojęciem zagrożenia klimatycznego. Problematyka poprawy warunków klimatycznych w wyrobiskach górniczych stanowiła istotną dziedzinę działalności naukowej pracowników Wydziału Górnictwa i Geoinżynierii Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Aktualnie problemy związane z projektowaniem przewietrzania i klimatyzacji wyrobisk w kopalniach podziemnych nabierają coraz większego znaczenia z uwagi na zwiększającą się głębokość prowadzenia robót górniczych. Właściwe zaprojektowanie klimatyzacji powinno zapewnić jak największą efektywność wykorzystania mocy chłodniczej w wyrobiskach górniczych. Dlatego też w artykule przedstawiono, na podstawie przeprowadzonych pomiarów, efektywność wykorzystania zabudowanej mocy chłodniczej oraz przedstawiono czynniki wpływające na jakość uzyskiwanych parametrów pracy instalacji klimatyzacyjnych. W końcowej części artykułu podano czynniki, które mogą przyczynić się do wzrostu efektywności klimatyzacji.

Abstract: In underground excavations with airflow the natural and technological sources of heat stream inflow occur. As a result, high temperatures occur in underground excavations, which, after taking into account equally high humidity, causes significant deterioration of climatic conditions. This causes a decrease in such functions of the human body as the ability to perceive, concentrate, attention, and perceptiveness. We refer to this adverse effect of temperature and humidity on the human body as climate hazard. The issue of improving climatic conditions in mining excavations was an important area of scientific activity of employees of the Faculty of Mining and Geoen지니어ing of the AGH University of Science and Technology in Krakow. Currently, problems related to the design of ventilation and air conditioning of excavations in underground mines are becoming increasingly important due to the increasing depth of mining works. Proper designing of air conditioning should ensure the greatest efficiency in the use of cooling power in mining excavations. Therefore, the article presents, based on the measurements carried out, the effectiveness of the use of built-in cooling power and presents factors affecting the quality of the obtained parameters of air conditioning systems. The final part of the article lists the factors that can contribute to the increase in the efficiency of air conditioning.

Słowa kluczowe:

zagrożenie klimatyczne, klimatyzacja, metody klimatyzacji, efektywność systemu klimatyzacji

Key words:

climate hazard, air condition, methods of air conditioning, efficiency of air-conditioning systems

1. Wprowadzenie

Warunki pracy w kopalniach podziemnych posiadają swoją specyfikę w porównaniu z tymi występującymi w zakładach na powierzchni. W kopalniach podziemnych cechują się one

przede wszystkim rozproszeniem miejsc pracy na znacznym obszarze oraz nieprzyjawnym dla człowieka środowiskiem pracy (Szlązak i in., 2005).

W wyrobiskach podziemnych występują naturalne i technologiczne źródła dopływu ciepła. W wyniku tego obserwuje się wysokie temperatury (Szlązak 1999, Szlązak i in., 2013a), co po uwzględnieniu równie wysokiej wilgotności powietrza,

*) AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, WGiG

powoduje znaczne pogorszenie warunków klimatycznych (Wacławik 2010, Szlązak i in.. 2013b).

O zagrożeniu klimatycznym w wyrobiskach podziemnych decydują parametry powietrza kopalnianego. Podczas przepływu przez wyrobiska zarówno one, jak i skład powietrza ulegają zmianie (Szlązak i in.. 2002).

Zmiany temperatury powietrza kopalnianego zachodzą na skutek procesów sprężania powietrza w polu sił ciężkości, wymiany ciepła i wilgoci pomiędzy górotworem i lokalnymi, dodatkowymi źródłami ciepła a przepływającym powietrzem. Dodatkowe źródła ciepła stanowią przede wszystkim maszyny i urządzenia, a w szczególności napędy elektryczne i spaliny. Największy wpływ na zmianę temperatury ma wymiana ciepła pomiędzy powietrzem a otaczającymi wyrobiska podziemne skałami. Charakter oraz intensywność tej wymiany zależy od wielu czynników, z których główną rolę odgrywa głębokość zalegania i związana z nią temperatura pierwotna skał. Droga przepływu powietrza z powierzchni do stanowisk pracy pod ziemią, podczas której dochodzi do wymiany ciepła i wilgoci, wynosi nawet kilka kilometrów (Szlązak i in.. 2009a).

O bezpośrednim stanie zagrożenia klimatycznego decyduje również właściwe planowanie wyrobisk podziemnych, transportu urobku i lokalizacji urządzeń elektrycznych oraz racjonalna wentylacja wyrobisk w aspekcie minimalizacji ogrzewania powietrza dopływającego do stanowisk pracy.

Wzrost głębokości prowadzenia robót górniczych powoduje, że zapewnienie stabilnych w czasie parametrów mikroklimatu drogą wentylacji w wyrobiskach górniczych jest trudne do uzyskania. Wtedy konieczne staje się zastosowanie klimatyzacji.

Efektem wieloletnich prac naukowo-badawczych pracowników Wydziału Górnictwa i Geoinżynierii (WGiG) Akademii Górniczo Hutniczej w Krakowie w zakresie klimatyzacji w kopalniach podziemnych jest kompleksowa metoda oceny obciążenia cieplnego wyrobisk górniczych oraz metodyka projektowania scentralizowanych układów klimatyzacyjnych (Wacławik 1971, Szlązak i in.. 2008c, Nowak, Filek 2009, Szlązak, Obracaj 2017). Klimatyzacja kopalń oparta jest o mobilne wymienniki ciepła (chłodziwo powietrza), przez co instalacje klimatyzacyjne muszą spełniać wymogi szybkiej przebudowy i automatycznej regulacji parametrów pracy (Szlązak i in.. 2014b, 2016).

Zespół parowników WGiG opracował wdrożone rozwiązanie układów klimatyzacji we wszystkich polskich kopalniach węgla kamiennego, począwszy od projektu pierwszej klimatyzacji centralnej w KWK „Pniówek” (uruchomienie w roku 2000 r. i rozbudowa w 2009 r.), która działa w układzie trigeneracyjnym (CHCP) (Szlązak i in.. 2000, 2001a, 2001b), a skończywszy na klimatyzacji centralnej w KWK „Borynia-Zofiówka-Jastrzębie, Ruch „Zofiówka” (uruchomiona w 2019 roku). Układ klimatyzacji centralnej w KWK „Borynia-Zofiówka-Jastrzębie, Ruch „Zofiówka” jako pierwszy w Polsce wykorzystuje zarówno podziemne, jak i powierzchniowe agregaty chłodnicze (Szlązak i in.. 2010). Zespół parowników WGiG zaprojektował również klimatyzację centralną w OKD Důl ĀSM (uruchomienie w roku 2010), jak również w kopalni ukraińskiej ПАО „ШАХТА ИМ. А.Ф. ЗАСЯДЬКО” w 2012 roku. Jako pierwszy w Polsce opracowali zasadę klimatyzacji grupowej (Szlązak i in.. 2004a, 2004b), wdrażając ją w KWK „Zofiówka” w roku 2002, a następnie w KWK „Borynia” – 2005 r., KWK „Jas-Mos” – 2006 r., KWK „Rydułtowy-Anna” – 2006 r. i 2008 r., KWK „Krupiński” – 2008 r., KWK „Bielszowice” – 2009 r., KWK „Szczygłowice” – 2009 r., OKD Důl Darkov – 2009 r., KWK „Staszic” – 2010 r. Zespół opracował również liczne projekty koncepcyjne poprawy warunków klimatycznych w kopalniach

rud miedzi KGHM „Polska Miedź” S.A.. Doświadczenie pracowników Pracowni Aerologii Górniczej WGiG zostało docenione na arenie międzynarodowej, co skutkowało wykonaniem projektów koncepcyjnych klimatyzacji w kopalniach ChRL, Indii, Turcji, Argentyny.

W dalszej części przedstawiono istotne założenia opracowanych rozwiązań klimatyzacyjnych.

2. Rozwiązania klimatyzacji podziemnych wyrobisk górniczych

Przy konieczności chłodzenia znacznej ilości miejsc pracy na dole kopalni i zapotrzebowaniu na większe moce chłodnicze stosuje się agregaty chłodnicze, które są usytuowane na powierzchni lub pod ziemią. W miarę wzrostu ilości maszyn klimatyzacyjnych instalowanych na dole, w kopalni osiąga się również granicę, powyżej której nie można już odprowadzić ciepła skraplania do zużytego prądu powietrza. W takiej sytuacji ciepło skraplania musi być odprowadzane za pomocą wody na powierzchnię (Szlązak i in.. 2002). Projektując systemy klimatyzacji centralnej należy zwracać uwagę na możliwość wykorzystania ciepła odpadowego z innych procesów technologicznych w kopalni oraz na zasadność i celowość stosowania odzysku ciepła skraplania (Szlązak i in.. 2001a, 2001b, 2010). W warunkach klimatycznych panujących w kopalniach wielu krajów należy uwzględnić możliwości wykorzystania swobodnego chłodzenia (Szlązak i in.. 2008a).

W technice klimatyzacji polskich kopalń występują obecnie dwie tendencje (Szlązak i in.. 2005, Szlązak, Obracaj 2017):

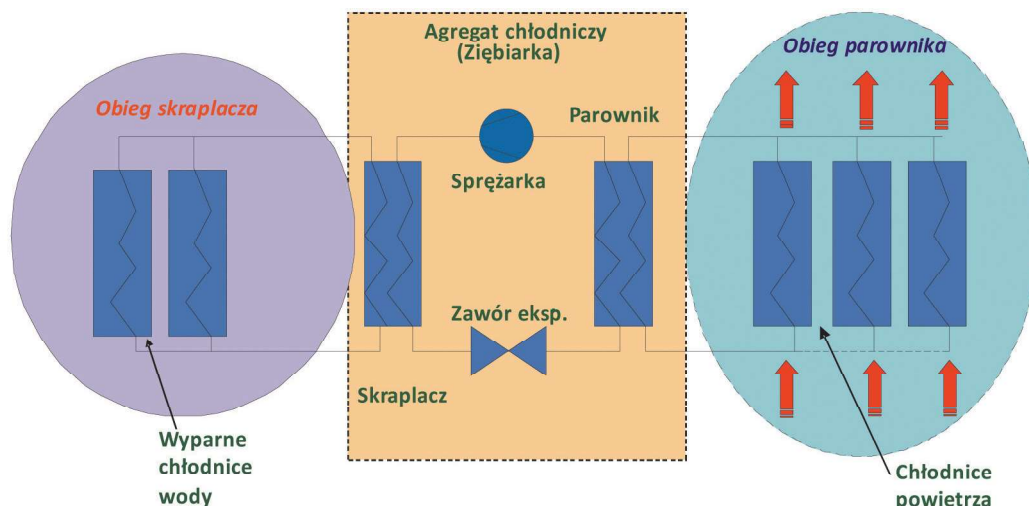
- stosowanie klimatyzacji lokalnej lub grupowej poprzez instalowanie maszyn klimatyzacyjnych mniejszej mocy w bezpośrednim sąsiedztwie oddziałów wydobywczych (rys. 1a),
- stosowanie klimatyzacji centralnej poprzez instalowanie maszyn klimatyzacyjnych o dużych mocach chłodniczych na powierzchni lub maszyn klimatyzacyjnych na dole w centralnym miejscu kopalni i transportujących „chłód” do oddziałów wydobywczych (rys. 1b).

W większości kopalń podziemnych następuje etapowy wzrost zagrożenia klimatycznego związany z koniecznością wybierania złoże na coraz niższych poziomach głębokościowych.

W wymienionych układach klimatyzacji wykorzystuje się urządzenia chłodnicze, które w zależności od czynnika pośredniczącego w wymianie ciepła (chłodziwo) można podzielić na:

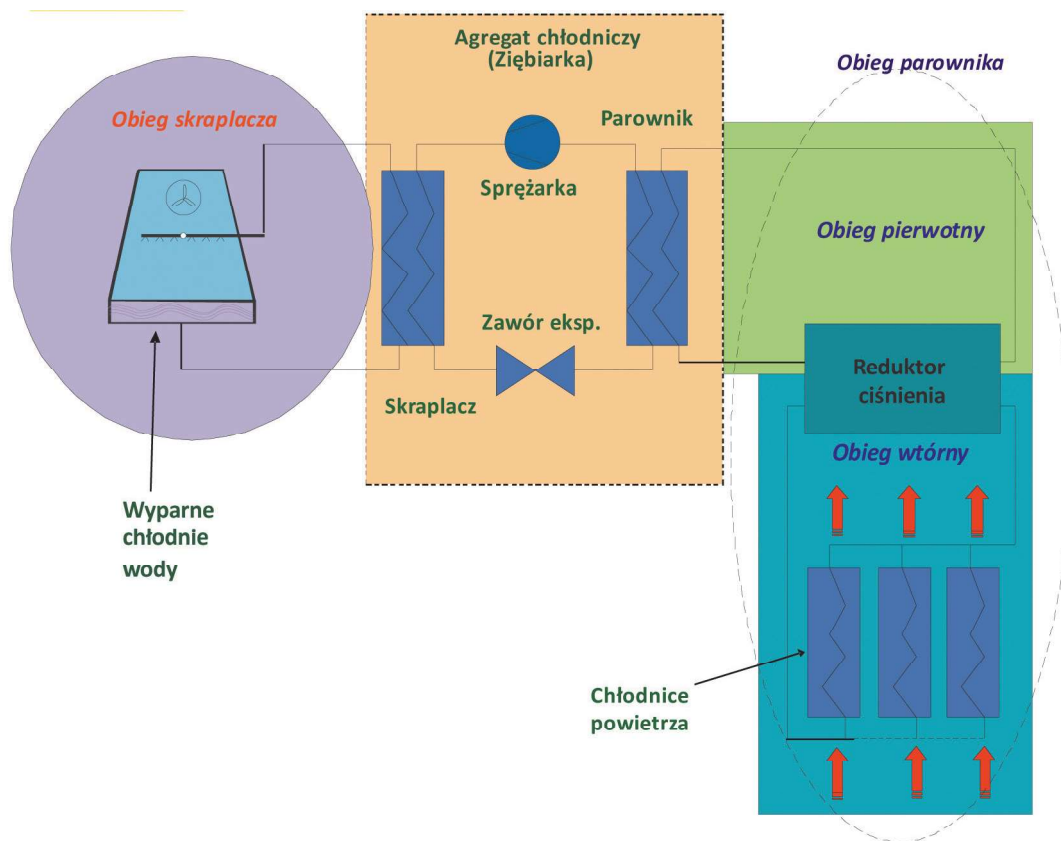
- urządzenia chłodnicze bezpośredniego działania,
- urządzenia chłodnicze pośredniego działania schładzające wodę (temperatura wody schładzanej 1,5-5°C),
- urządzeniach wytwarzające lód sztuczny (wykorzystywany następnie do produkcji wody lodowej lub zawiesiny lodowej),
- urządzenia chłodnicze wytwarzające zawiesinę lodową (czasem zwaną również lodem zawiesinowym).

W polskich kopalniach podziemnych wykorzystywane są urządzenia chłodnicze bezpośredniego działania i urządzenia chłodnicze pośredniego działania do schładzania wody (Szlązak i in.. 2007, 2008b, 2009b, 2017). W klimatyzacji centralnej wykorzystuje się powierzchniowe agregaty schładzające wodę, która transportowana jest pniowymi rurociągami na dół kopalni i rozprowadzana siecią rurociągów do podziemnych chłodnic powietrza. Wzrost ciśnienia hydrostatycznego wody w takim obiegu chłodniczym uniemożliwia bezpośrednie zasilanie chłodnic powietrza. Chłodziwo i podziemna instalacja chłodnicza projektowane są na maksymalne ciśnienia 4 MPa. Zwiększenie dopuszczalnego ciśnienia w instalacji



Rys. 1a. Schemat ideowy klimatyzacji z podziemnymi urządzeniami chłodniczymi o działaniu pośrednim (Szlązak, Obracaj 2017)

Fig. 1a. Schematic diagram of indirect cooling system with an underground refrigeration plant (Szlązak, Obracaj 2017)



Rys. 1b. Schemat ideowy klimatyzacji z powierzchniowymi urządzeniami chłodniczymi o działaniu pośrednim (Szlązak, Obracaj 2017)

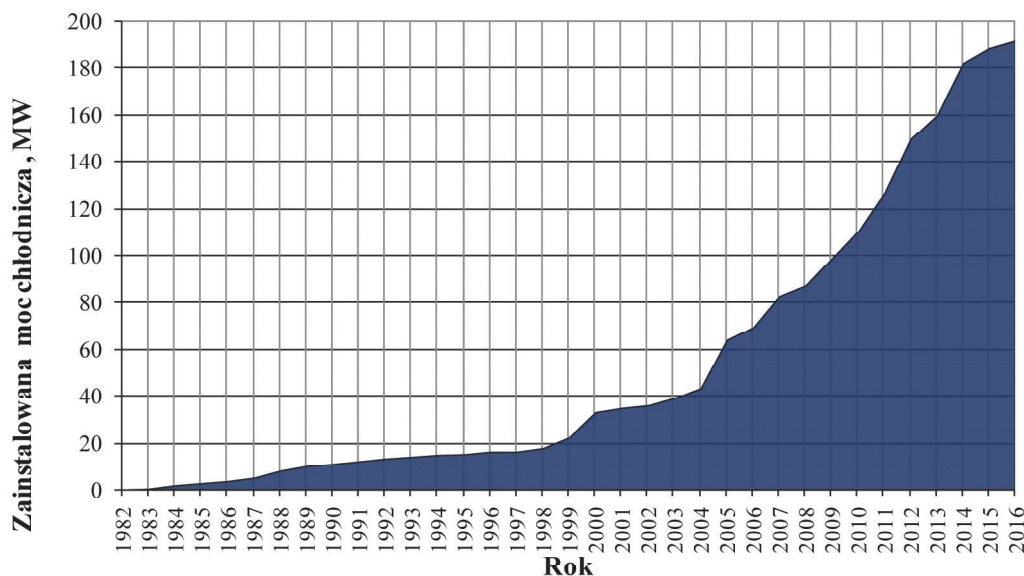
Fig. 1b. Schematic diagram of indirect cooling system with a surface refrigeration plant (Szlązak, Obracaj 2017)

nie jest ekonomicznie uzasadnione. Sposoby redukcji tego ciśnienia hydrostatycznego przedstawiono między innymi w pracach: (Szlązak, Obracaj 2014a, Szlązak i in.. 2018b).

W światowej technice klimatyzacyjnej powszechnie wykorzystuje się energię chłodniczą z ciepła topnienia lodu (Szlązak i in.. 2011). Aktualnie rozważa się wprowadzenie technologii produkcji zawiesziny lodowej dla układów klima-

tyzacyjnych polskich kopalń podziemnych, która wcześniej została teoretycznie opracowana (Szlązak i in.. 2012).

Według stanu na koniec 2016 roku w polskich kopalniach całkowita zainstalowana moc urządzeń chłodniczych wynosiła 193 MW_{ch}. Zmiany zainstalowanej mocy chłodniczej w poszczególnych latach przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Zmiana mocy chłodniczej zainstalowanej w polskich kopalniach
Fig. 2. Changes of cooling power installed in polish coal mines

3. Badania efektywności pracujących układów klimatyzacyjnych

Właściwe zaprojektowanie układu klimatyzacji powinno zapewnić jak największą efektywność wykorzystania mocy chłodniczej w wyrobiskach górniczych (Szlązak i in., 2007, 2018). Dlatego też w artykule przedstawiono, na podstawie przeprowadzonych pomiarów, efektywność wykorzystania zabudowanej mocy chłodniczej oraz opisano czynniki wpływające na obniżenie efektywności pracy układu klimatyzacji.

W celu oceny efektywności instalacji klimatyzacji przeprowadzono badania działania układów klimatyzacyjnych w wybranych kopalniach węgla kamiennego. Badania polegały na określeniu bilansu wymiany ciepła w chłodnicach powietrza oraz w skraplaczach urządzeń bezpośredniego działania, jak również w pozostałych elementach dołowej instalacji klimatyzacyjnej. W tym celu konieczne było skontrolowanie parametrów wody lodowej w sieci rurociągów oraz parametrów pracy agregatów chłodniczych i wyparnych chłodnic wody.

Metodyka badań (Szlązak i in., 2018a)

Realizacja przedstawionego wyżej celu obejmowała:

- pomiary strumienia ciepła odbieranego w chłodnicach powietrza,
- pomiary przepływu wody i ocena stanu instalacji rurociągów wody lodowej oraz wody chłodzącej (w przypadku klimatyzacji grupowej),
- pomiary wydajności chłodniczej agregatów wody lodowej (w przypadku klimatyzacji grupowej) oraz mocy chłodniczej dostarczanej z powierzchniowych stacji klimatyzacji centralnych,
- ocenę stanu technicznego instalacji,
- określenie kierunków poprawy efektywności działania klimatyzacji.

Przeprowadzone pomiary dotyczyły 62 chłodnic powietrza oraz skraplaczy urządzeń bezpośredniego działania, kontroli parametrów wody lodowej w sieci rurociągów oraz, w przypadku klimatyzacji grupowej, parametrów pracy agregatów chłodniczych i wyparnych chłodnic wody. Pomiary przeprowadzono w 6 kopalniach węgla kamiennego.

Wymiana ciepła w chłodnicach przeponowych związana jest z bilansem entalpii czynników przepływających po obu stronach przepony, którymi są powietrze kopalniane oraz chłodziwo. Chłodziwem była woda lodowa doprowadzana i odprowadzana siecią rurociągów.

Efektywność tego procesu zależy od parametrów powietrza i wody lodowej na wejściu do chłodnicy powietrza.

Uzyskiwana moc chłodnicza chłodnic powietrza Q_{ch} jest związana z bilansem entalpii powietrza i wody. Bilans ten można przedstawić następującą zależnością:

$$\dot{Q}_{ch} = \dot{H}_2 - \dot{H}_1 - \dot{H}_{skr} + \dot{Q}_{str} = \dot{H}_{H_2O-2} - \dot{H}_{H_2O-1} \quad (1)$$

gdzie:

\dot{H}_1 – strumień entalpii powietrza na wlocie do chłodnicy (za wentylatorem lutniowym),

\dot{H}_2 – strumień entalpii powietrza na wylocie do chłodnicy (z uwzględnieniem entalpii ewentualnych kropeł wynoszonych przez wypływające z chłodnicy powietrze),

\dot{H}_{skr} – strumień entalpii wykroplonej pary wodnej (odprowadzanej z chłodnicy niezależnie od kropeł w powietrzu wypływającym),

\dot{Q}_{str} – strumień cieplny wymieniony między płaszczem chłodnicy a otoczeniem,

\dot{H}_{H_2O-1} – strumień entalpii wody na wlocie do węzownicy chłodnicy,

\dot{H}_{H_2O-2} – strumień entalpii wody na wylocie z węzownicy chłodnicy.

Jeżeli uwzględnimy moc układu wentylator – chłodnica, to moc chłodnicza Q całego układu przedstawia się następująco:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{ch} - \dot{Q}_w \quad (2)$$

gdzie:

\dot{Q}_w – strumień ciepła dopływający od wentylatora do powietrza wlotowego chłodnicy.

W celu wykonania bilansu cieplnego chłodnic powietrza i wyznaczenia entalpii konieczne było przeprowadzenie pomiaru temperatury i zawartości wilgoci w powietrzu przed i za chłodnicą oraz natężenia objętościowego przepływu powietrza. Podobnie dla bilansu entalpii wody konieczne

było przeprowadzenie pomiaru temperatury wody na wlocie i wylocie z chłodnic powietrza oraz przepływu objętościowego wody.

W celu oceny efektywności schładzania powietrza przeprowadzono pomiary następujących wielkości:

- temperatury powietrza wg termometru suchego i wilgotnego na wlocie do wentylatora chłodnicy,
- temperatury powietrza wg termometru suchego i wilgotnego na wylocie z chłodnicy,
- temperatury powietrza wg termometru suchego i wilgotnego pomiędzy wylotem wentylatora a wlotem do chłodnicy,
- prędkości średniej powietrza z przekroju poprzecznego wylotu z chłodnicy powietrza i wlotu do wentylatora chłodnicy,
- temperatury wody lodowej zasilającej i powrotnej (chłodnicę lub urządzenie chłodnicze bezpośredniego działania),
- ciśnienia atmosferycznego powietrza w miejscu zabudowy chłodnicy,
- pomiary przepływu wody i ocena stanu instalacji rurociągów wody lodowej oraz wody chłodzącej,
- ocenę stanu technicznego instalacji.

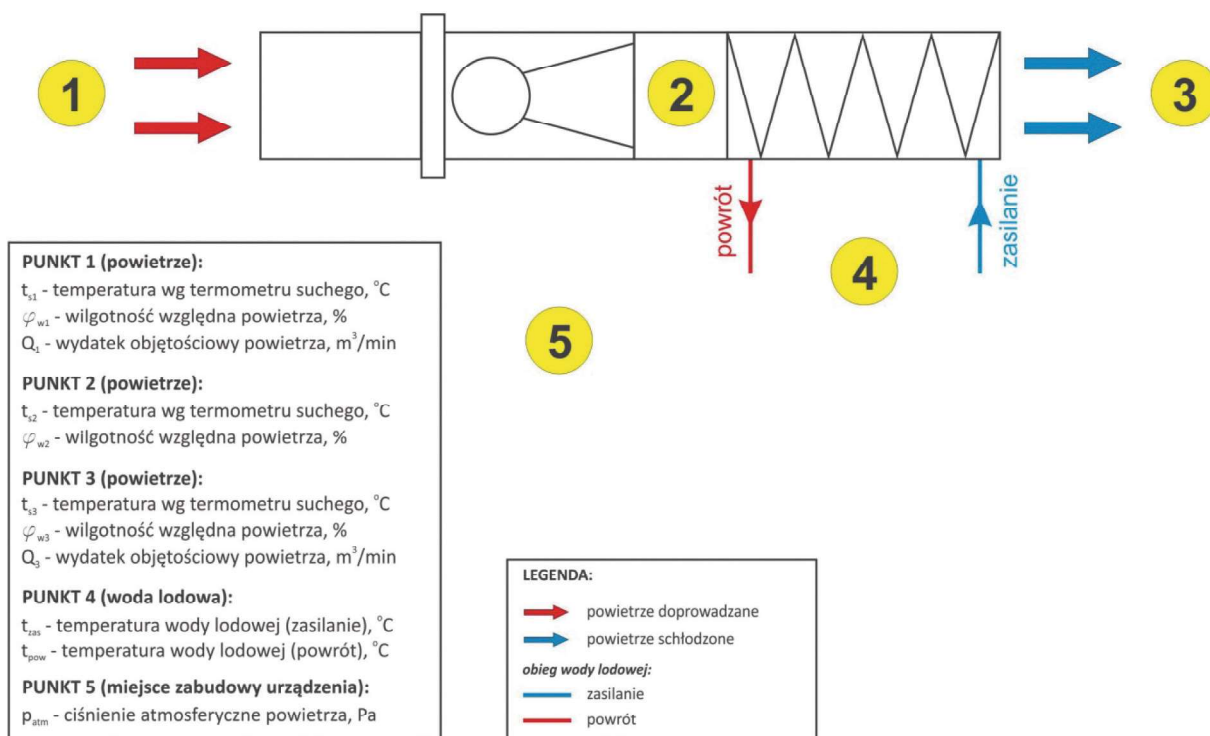
Na rysunku 3 przedstawiono punkty pomiarowe dla badanych chłodnic powietrza.

W trakcie prowadzonych pomiarów wytwarzana moc chłodnicza układów klimatyzacji w sześciu kopalniach węgla

kamiennego wynosiła 13 940 kW w stosunku do dyspozycyjnej mocy chłodniczej 24 900 kW. Różnica w wytworzonej mocy chłodniczej i dyspozycyjnej wynikała z faktu braku odpowiedniego odbioru chłodu w wyrobiskach górniczych lub w przypadku klimatyzacji grupowej odbioru ciepła skraplania na chłodnicach wyparnych. Uzyskiwana moc chłodnicza wykorzystywana była w następujący sposób:

- w chłodnicach powietrza 7 380 kW,
- w podłączonych skraplaczach urządzeń chłodniczych 2 980 kW,
- straty w rurociągach 3 580 kW,
- RAZEM 13 940 kW.

Efektywność klimatyzacji określono poprzez wskaźnik uzyskiwanej mocy do dyspozycyjnej mocy chłodniczej badanych układów klimatyzacyjnych. W takim wskaźniku konieczne jest uwzględnienie mocy urządzeń chłodniczych bezpośredniego (lub pośredniego) działania, których skraplacze są podłączone do instalacji klimatyzacji. Konieczność uwzględnienia skraplaczy wynika z tego, że część mocy przekazywana jest na ich chłodzenie. Suma mocy agregatów chłodniczych i urządzeń chłodniczych bezpośredniego oraz pośredniego działania podłączonych do rurociągów klimatyzacji wynosiła 26 792 kW. Wskaźniki efektywności przedstawiono w tabeli 1.



Rys. 3. Chodnica powietrza z lokalizacją punktów pomiarowych

Fig. 3. Air cooler with location of measuring points

Tabela 1. Wskaźnik efektywności działania analizowanych układów klimatyzacyjnych

Table 1. Performance indicator of analysed air conditioning systems.

Rodzaj wskaźnika	Uzyskana moc chłodnicza, KW	Dyspozycyjna moc chłodnicza, KW	Wskaźnik efektywności
Całkowity	13 940	26 792	0,52
Bez uwzględnienia strat w rurociągach	10 360	26 792	0,39
Bez uwzględnienia skraplaczy urządzeń chłodniczych oraz strat w rurociągach	7 380	21 700	0,34

Zgodnie z przeprowadzonymi pomiarami instalacje klimatyzacji uzyskiwały średni wskaźnik efektywności wykorzystania mocy na poziomie 34%. Po uwzględnieniu działania urządzeń bezpośredniego i pośredniego działania podłączonych do tych układów wykorzystanie wynosi 39% przy jednoczesnym wzroście zużycia energii elektrycznej.

Przyczyną tak niskiej efektywności są:

- straty ciepła w rurociągach,
- brak możliwości doprowadzenia wymaganego strumienia wody do chłodnic powietrza (duże opory przepływu, brak regulacji w rozprowadzaniu wody lodowej),
- niewłaściwa lokalizacja chłodnic powietrza.

Chłodnice powietrza nie uzyskiwały możliwie maksymalnych wydajności chłodniczych. Kopalnie nie wykorzystują w pełni posiadanej mocy chłodniczej z uwagi na niski odbiór ciepła w chłodnicach. Dlatego w większości podłączają skraplacze urządzeń chłodniczych do sieci rurociągów wody lodowej, pogarszając wskaźnik efektywności wykorzystania wytwarzanej mocy chłodniczej.

Przyczyny niskiej efektywności działania klimatyzacji

Na podstawie przeprowadzonego audytu wyróżniono następujące podstawowe problemy we właściwej efektywności klimatyzacji:

- straty mocy chłodniczej w rurociągach,
- problemy z uzyskiwaniem wymaganej mocy chłodniczej przez chłodnice powietrza oraz urządzenia chłodnicze,
- problem z obniżeniem temperatury powietrza w kontekście wilgotności powietrza.

Poniżej scharakteryzowano te problemy oraz podano ich przyczyny.

Straty „chłodu” w rurociągach

Straty mocy chłodniczej w rurociągach istotnie wpływają na wartość mocy chłodniczej, którą można wykorzystać w miejscach schładzania powietrza. W projektach klimatyzacji były one uwzględniane i generalnie w większości kopalń nie są one znacznie większe niż zakładano. Niemniej jednak wynikają one częściowo z braku dbałości o stan izolacji rurociągów doprowadzających wodę lodową do chłodnic powietrza. Można przyjąć założenie, że straty ciepła w rurociągach nie są do końca stratami, gdyż rurociągi przejmują ciepło od powietrza doprowadzanego do rejonów, jednak przyczyniają się one

do wzrostu temperatury wody na wlocie do chłodnic, co obniża skuteczność schładzania powietrza. Należy również pamiętać, że straty ciepła w rurociągach są odwrotnie proporcjonalne do prędkości wody w rurociągach. W przypadku niskiej prędkości wody (poniżej 0,5 m/s) następuje większy dopływ strumienia ciepła od powietrza do wody niż przy wyższych prędkościach (powyżej 1,5 m/s). Jednakże zwiększanie prędkości przepływu zwiększa straty ciśnienia przepływającej wody. Dlatego istotna jest przebudowa rurociągów w rejonach w zależności od wymaganej liczby podłączanych chłodnic powietrza. Opory przepływu w sieci rurociągów muszą być każdorazowo przy przebudowie wyznaczone w kontekście parametrów pracy pomp obiegowych. Na rysunku 4 przedstawiono stratę mocy chłodniczej w rurociągach w poszczególnych kopalniach.

Problemy z uzyskiwaniem wymaganej mocy chłodniczej przez chłodnice powietrza oraz urządzenia chłodnicze

Badane chłodnice powietrza jako wymienniki ciepła typu woda-powietrze podzielono na dwie grupy w zależności od mocy chłodniczej podawanej przez producenta:

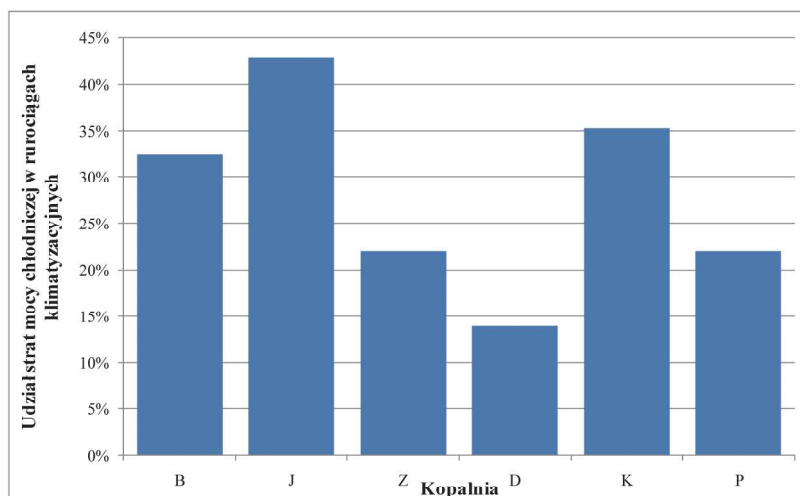
- chłodnice powietrza o jednostkowej mocy znamionowej w przedziale od 250 do 300 kW – 45 sztuk objętych pomiarami,
- chłodnice powietrza o mocy znamionowej w przedziale od 300 kW do 450 kW – 17 sztuk objętych pomiarami.

Tylko jedna z sześćdziesięciu dwóch przebadanych chłodnic powietrza uzyskiwała wymaganą moc chłodniczą. Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono histogramy mocy uzyskiwanych przez chłodnice objęte audytem, przy czym rysunek 5 odpowiada chłodnicom o mocach podawanych przez producentów w przedziale od 250 do 350 kW, natomiast rysunek 6 odpowiada chłodnicom o mocach od 350 do 450 kW.

Urządzenia chłodnicze podłączone do instalacji klimatyzacji również nie uzyskiwały wymaganych wydajności chłodniczych.

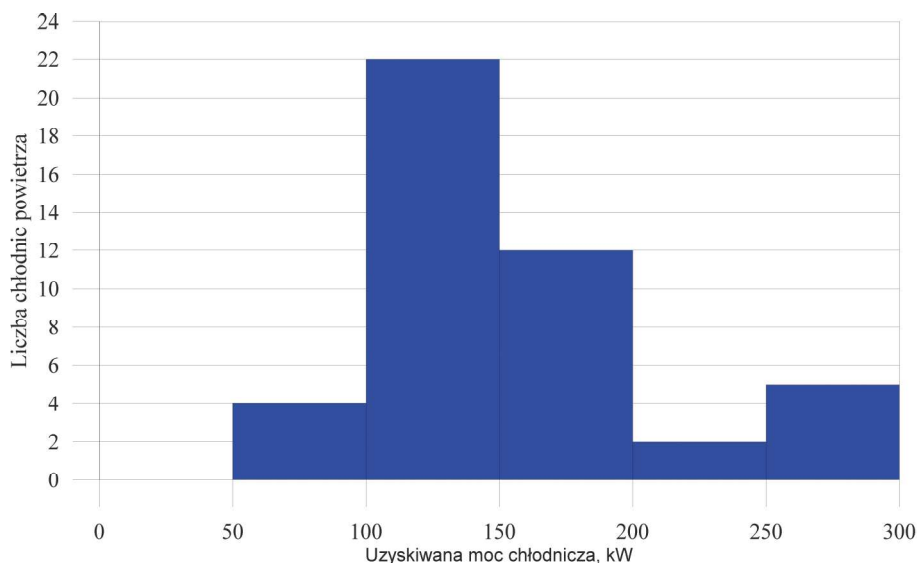
Przyczyny niskiej mocy chłodnic powietrza:

- zbyt mały strumień doprowadzanej wody (brak kontroli przepływu i regulacji rozpyływu wody, zbyt duże opory przepływu, brak przebudowy rurociągów magistralnych). Na rysunku 7 przedstawiono zależność mocy chłodnicy od strumienia objętościowego wody,



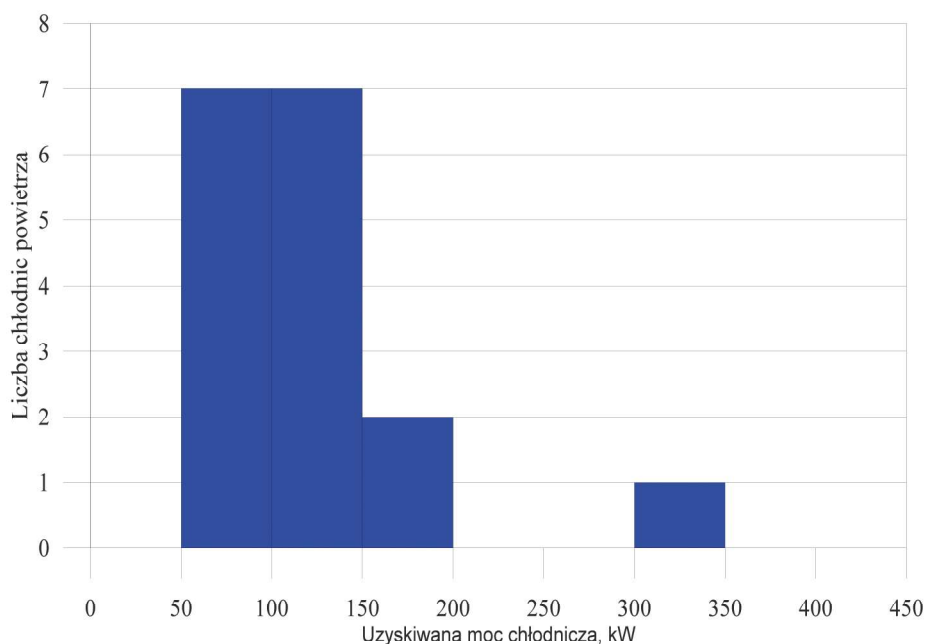
Rys. 4. Strata mocy chłodniczej w rurociągach klimatyzacyjnych analizowanych kopalń

Fig. 4. Loss of cooling power in the air conditioning pipelines of analysed coal mines



Rys. 5. Histogram mocy uzyskiwanych przez chłodnice objęte audytem (o znamionowej mocy chłodniczej od 250 do 300 kW)

Fig. 5. Histogram of the power obtained by the coolers covered by the audit (rated cooling capacity from 250 to 300 kW)



Rys. 6. Histogram mocy uzyskiwanych przez chłodnice objęte audytem (o znamionowej mocy chłodniczej od 300 do 450 kW)

Fig. 6. Histogram of the power obtained by the coolers covered by the audit (rated cooling capacity or power from 300 to 450 kW)

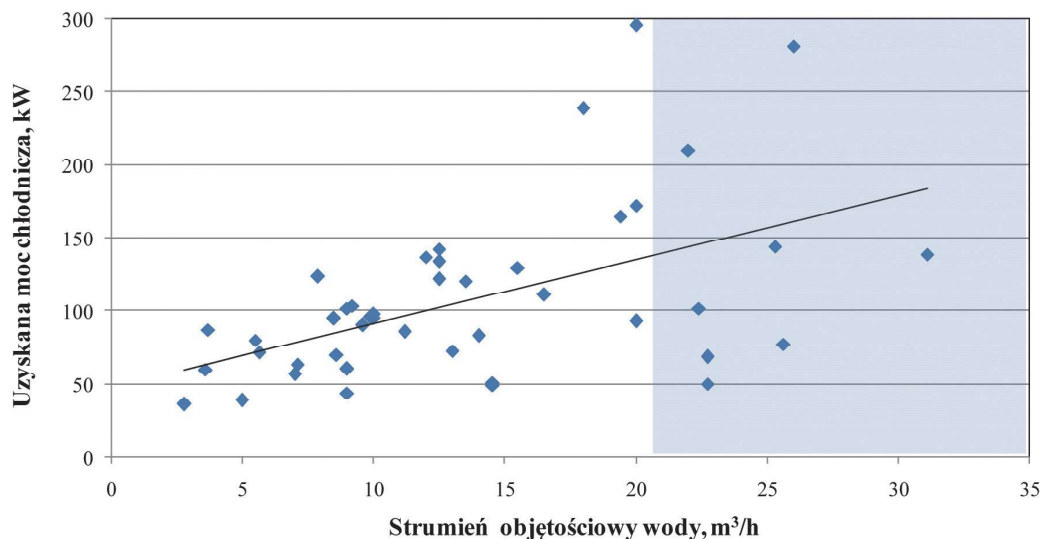
- zbyt wysoka temperatura doprowadzanej wody (brak kontroli i regulacji rozplywu wody). Na rysunku 8 przedstawiono zależność mocy chłodnicy od temperatury wody,
- zbyt niska temperatura powietrza w miejscu lokalizacji chłodnicy (niewłaściwa lokalizacja chłodnic). Na rysunku 9 przedstawiono zależność mocy chłodnicy od temperatury powietrza przed chłodnicą.

Na rysunkach 7-9 zacieniowano obszar wymaganych parametrów wody i powietrza. Aby uzyskać wymaganą moc chłodniczą, zarówno parametry wody jak i powietrza wlotowego muszą zawierać się w tych przedziałach.

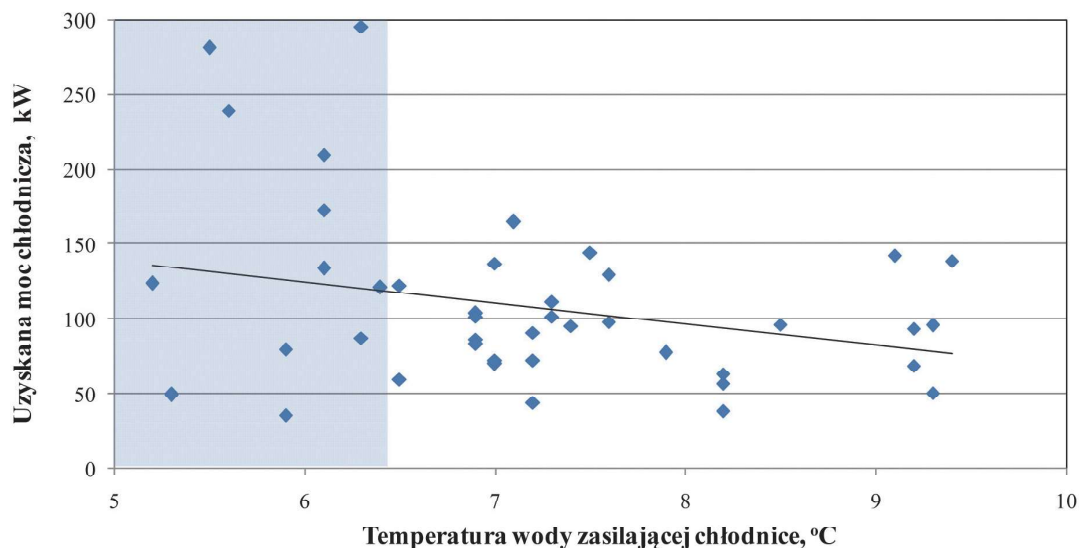
Istotne znaczenie ma również dbałość o czystość węzownic w chłodnicach powietrza. Częstotliwość zmywania węzownic w chłodnicach powinna wynikać z warunków ich zabudowy i w większości przypadków powinna być częstsza niż podaje producent w Dokumentacji Techniczno-Ruchowej chłodnicy.

Problemy z obniżeniem temperatury powietrza w kontekście wilgotności powietrza

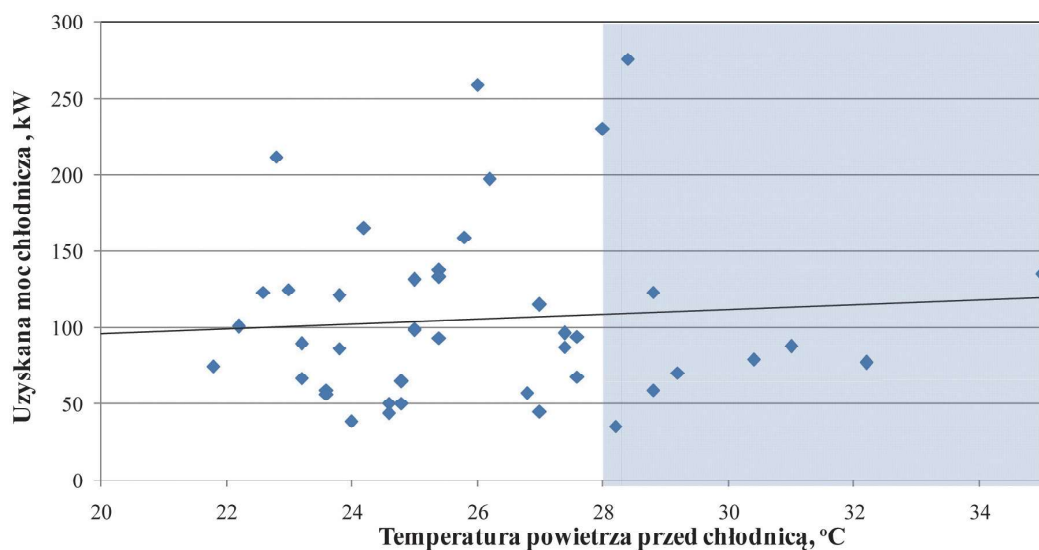
Chłodnice powietrza spełniają zarówno funkcję obniżania temperatury, jak również osuszania powietrza. W przypadku wysokiej wilgotności powietrza, jaka ma miejsce w wyrobi-



Rys. 7. Zależność mocy chłodnicy od strumienia objętościowego wody
 Fig. 7. Dependence of cooler power on water flux



Rys. 8. Zależność mocy chłodnicy od temperatury wody wlotowej
 Fig. 8. Dependence of cooler power on temperature of inlet water



Rys. 9. Zależność mocy chłodnicy od temperatury powietrza przed chłodnicą
 Fig. 9. Dependence of cooler power on air temperature in front of the cooler

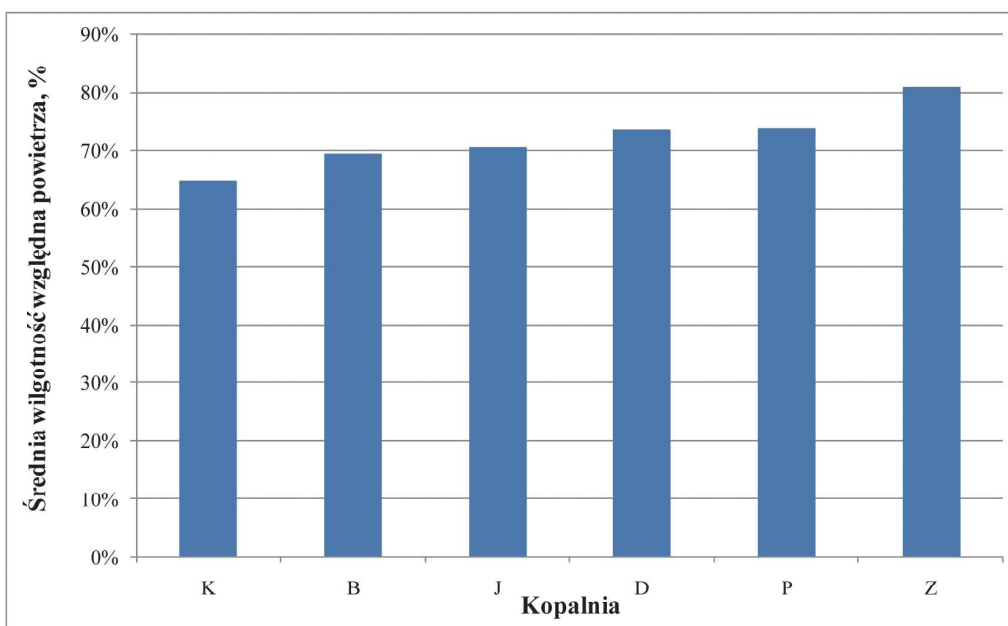
skach kopalnianych, część mocy chłodniczej przekazywana jest na wykroplenie pary wodnej z powietrza, a część na obniżenie temperatury powietrza. Urządzenia chłodnicze i chłodnice powietrza objęte badaniami często nie umożliwiały wystarczającego (do poziomu określonego przepisami) obniżenia temperatury powietrza w wyrobisku, nawet w przypadku, gdy wartości parametrów takich jak: temperatura oraz strumień doprowadzanej wody, temperatura powietrza w miejscu zabudowy chłodnicy, strumień objętościowy przepływającego powietrza, były zbliżone do podawanych przez producenta. Związane to było właśnie z osuszaniem powietrza.

Często podawana przez producentów moc chłodnicza dotyczy wilgotności względnej powietrza poniżej 70%. W takich przypadkach eksploatowane chłodnice w warunkach wilgotności 80% lub wyższej nie osiągną podawanych mocy chłodniczych, nawet przy zapewnieniu wszystkich pozostałych parametrów powietrza (temperatura i strumień objętości) i wody. Na rysunku 10 przedstawiono średnią

wilgotność względną w poszczególnych kopalniach. Duża zawartość wilgoci w powietrzu kopalnianym powoduje, że trudniej obniżyć jego temperaturę (rysunek 11), gdyż znaczna część mocy przeznaczana jest na jego osuszenie. Na rysunku 12 przedstawiono udział mocy chłodniczej w wymianie ciepła w chłodnicach w poszczególnych kopalniach.

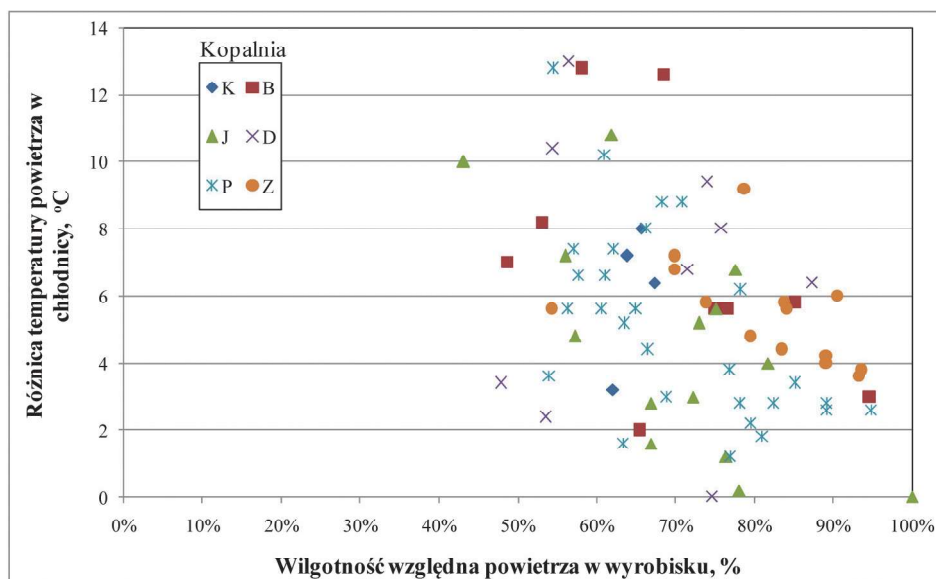
W związku z wysoką wilgotnością powietrza w kopalniach objętych audytem należy dążyć do ograniczania niepotrzebnego nawilżania powietrza w rejonach (likwidacja rozlewisk wody w wyrobiskach).

Audyty przeprowadzony był w okresie zimowym. W okresie letnim efektywność wykorzystania mocy chłodniczej powinna wzrosnąć. Kopalnie powinny podjąć działania zmierzające do lepszego wykorzystywania mocy chłodniczej. Niemniej jednak w kilku kopalniach występować będzie brak mocy chłodniczej z uwagi na zakres robót górniczych w warunkach wysokiej temperatury pierwotnej górotworu.



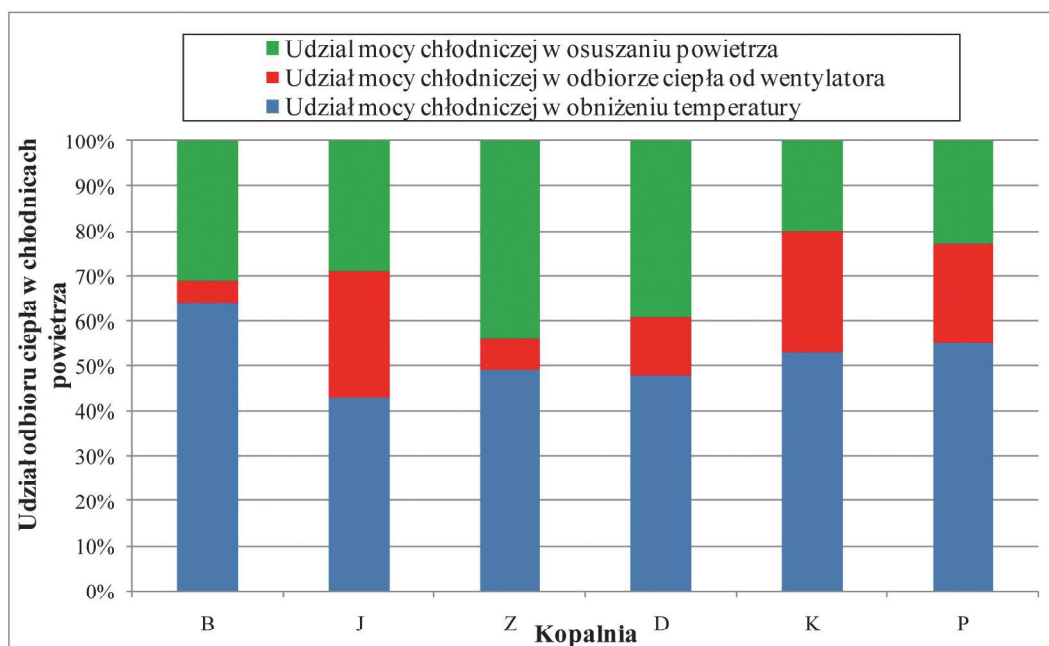
Rys. 10. Średnia wilgotność względna w poszczególnych kopalniach

Fig. 10. Average relative humidity in the individual coal mines



Rys. 11. Wpływ wilgotności powietrza na obniżenie temperatury w chłodnicach w poszczególnych kopalniach

Fig. 11. Influence of air humidity on the decrease of temperature in coolers of individual coal mines



Rys. 12. Udział mocy chłodniczej w wymianie ciepła w chłodnicach w poszczególnych kopalniach
 Fig. 12 The share of cooling power in the heat exchange in coolers of individual coal mines

4. Podsumowanie

W kopalniach podziemnych stosuje się urządzenia chłodnicze o działaniu pośrednim lub bezpośrednim. Urządzenia te wykorzystuje się w systemach klimatyzacji lokalnej, grupowej i centralnej. Stosowanie klimatyzacji jest ekonomicznie uzasadnione w przypadku zapotrzebowania znacznych mocy chłodniczej w różnych rejonach kopalni i braku możliwości odprowadzenia ciepła skraplania do rejonowych prądów powietrza odprowadzanego.

Przeprowadzone badania sześciu układów klimatyzacji opartych o wodę lodową jako chłodziwo wykazały, że pomimo klimatyzacji w kopalniach występowały przekroczenia dopuszczalnej temperatury powietrza 28°C według termometru suchego. Efektywność chłodnic powietrza zależy między innymi od ich budowy i utrzymywania w nich czystości powierzchni wymiany ciepła. Zasadniczą przyczyną uzyskiwania niskich parametrów chłodniczych jest jednak brak możliwości ich lokalizacji w miejscu najwyższych temperatur powietrza oraz zbyt mały strumień doprowadzanej wody o zbyt wysokiej temperaturze.

Chłodnice powietrza powinny być przebudowywane w miejsca o najwyższych temperaturach powietrza wraz z postępem przodków eksploatacyjnych i ścianowych oraz chwilowymi zmianami parametrów powietrza doprowadzanego. Przebudowa chłodnic pociąga za sobą konieczność częściej przebudowy rurociągów instalacji chłodniczej i wymaga przeprowadzania bieżących regulacji w rozplywie wody lodowej.

Kopalnie w ograniczonym zakresie kontrolują parametry wody w sieci rurociągów, co nie pozwala na prowadzenie bieżącej regulacji rozplywu wody. Zgodnie z opracowanymi projektami klimatyzacji instalacje klimatyzacji grupowej i centralnej muszą być wyposażone w przepływomierze i mierniki temperatury pozwalające na bieżący monitoring parametrów wody. Kontrola tych parametrów umożliwi podejmowanie szybszych decyzji o regulacji rozplywu wody czy konieczności przebudowy chłodnic powietrza lub przebudowy rurociągów magistralnych.

Instalacja rurowa rozprowadzająca wodę lodową do chłodnic powietrza musi być przebudowywana zgodnie z założeniami projektowymi. Podłączenie chłodnic powietrza w nowym rejonie, każdorazowo wymaga przeprowadzenia obliczeń strat ciśnienia wody w instalacji. Na tej podstawie należy podejmować decyzję o przebudowie i wymianie rurociągów na większe średnice. Wykorzystać można istniejące oprogramowanie wspomagające projektowanie sieci rurociągów wody lodowej.

Artykuł zrealizowano w ramach subwencji nr 16.16.100.215.

Literatura

- NOWAK B., FILEK K. 2009 - Mathematical description of media parameters changes in the compression refrigerator. Archives of Mining Sciences. Vol. 54, iss. 1, 13–34.
- SZLAŹAK J., SZLAŹAK N., OBRACAJ D., BOROWSKI M. 2001b - Wykorzystanie ciepła odpadowego w skojarzonym układzie energetyczno-chłodniczym. Kwartalnik AGH „Górnictwo”, z. 2, 121-128.
- SZLAŹAK N., OBRACAJ D., BOROWSKI M. 1999 - Warunki klimatyczne w wyrobiskach ścianowych przy miejscowym i rozłożonym schładzaniu powietrza. Kwartalnik „Górnictwo”, z.4, 253-262.
- SZLAŹAK N., OBRACAJ D., BOROWSKI M. 2001a - Przykład wykorzystania chłodnic absorpcyjnych w skojarzonym układzie energetyczno-chłodniczym. „Technika chłodnicza i klimatyzacyjna” nr 6-7, 233-236.
- SZLAŹAK N., OBRACAJ D., BOROWSKI M. 2008a - „Free-Cooling” w klimatyzacji kopalń podziemnych. „Wiadomości Górnicze” 59 (2), 97-102.
- SZLAŹAK N., OBRACAJ D., BOROWSKI M. 2008b - Methods for controlling temperature hazard in Polish coal mines. Archives of Mining Sciences, Vol. 53, iss.4, 497–510.
- SZLAŹAK N., OBRACAJ D., BOROWSKI M. 2008c - Prognozowanie temperatury i wilgotności powietrza w wyrobiskach z wentylacją odrębną i urządzeniami chłodniczymi bezpośredniego działania za pomocą programu komputerowego. „Wiadomości Górnicze” 59 (2), 86-96.

- SZŁĄZAK N., OBRACAJ D., BOROWSKI M. 2009a - Wykorzystanie swobodnego chłodzenia w systemach klimatyzacji kopalń podziemnych. „Chłodnictwo i Klimatyzacja” nr 4, 60-64.
- SZŁĄZAK N., OBRACAJ D., BOROWSKI M. 2010 - Możliwości rozbudowy klimatyzacji grupowej w kopalni podziemnej. „Wiadomości Górnicze” 61 (9), 536-543.
- SZŁĄZAK N., BOROWSKI M., OBRACAJ D., SWOLKIEŃ J., KORZEC M., PIERGIES K. 2017 - Current ventilation problems in hard coal mines. Ed. by Nikodem Szlązak. AGH University of Science and Technology Press, Krakow.
- SZŁĄZAK N., NAWRAT S., JAKUBÓW A. 2000 - Pierwsza klimatyzacja centralna w KWK „Pniówek” Jastrzębskiej Spółki Węglowej S.A.. „Przeгляд Górniczy” nr 10.
- SZŁĄZAK N., OBRACAJ D. 2012 - Klimatyzacja kopalni podziemnej z wykorzystaniem lodu zawieszinowego. Kwartalnik „Górnictwo i Geologia”. T.7, z. 4, 71-86.
- SZŁĄZAK N., OBRACAJ D. 2017 - Metody klimatyzacji wyrobisk górniczych w kopalniach podziemnych. W: Aktualny stan zagrożeń aerologicznych w kopalniach podziemnych. Monografia pod red. N. Szlązaka. Agencja Wydawniczo-Poligraficzna ART-TEKST., Kraków, 19-36.
- SZŁĄZAK N., OBRACAJ D., BOROWSKI M. 2002 - Efektywność chłodzenia powietrza w rejonach eksploatacyjnych w oparciu o centralną klimatyzację. Materiały Szkoły Eksploatacji Podziemnej. T. 2, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków, 1087-1099.
- SZŁĄZAK N., OBRACAJ D., BOROWSKI M. 2005 - Kierunki rozwoju klimatyzacji w polskich kopalniach węgla kamiennego. XXXVII Dni Chłodnictwa: aktualne tendencje w rozwiązaniach technicznych urządzeń i systemów chłodniczych i klimatyzacyjnych. Konferencja naukowo-techniczna, Poznań, 23-24 listopada 2005. Wyd. System Chłodnictwo i Klimatyzacja Sp. z o. o. Poznań, 243-256.
- SZŁĄZAK N., OBRACAJ D., BOROWSKI M. 2007 - Ocena pracy przepływowych chłodnic powietrza w kopalniach węgla kamiennego. Materiały XVI Szkoły Eksploatacji Podziemnej. Wyd. IGSMiEPAN, 363-373.
- SZŁĄZAK N., OBRACAJ D., BOROWSKI M. 2011 - Wykorzystanie lodu w klimatyzacji kopalń. Prace Naukowe GIG. „Górnictwo i Środowisko”, nr 1/1, 367-378.
- SZŁĄZAK N., OBRACAJ D., BOROWSKI M., KUBACZKA Cz. 2004a - Klimatyzacja grupowa podziemnych wyrobisk górniczych. Materiały Konferencji Naukowo – Technicznej XXXVI Dni Chłodnictwa, nt.: „Nowe rozwiązania techniczne w chłodnictwie i klimatyzacji w zastosowaniach praktycznych”, Poznań, 14-15.09.2004. Wyd. System Chłodnictwo i Klimatyzacja Sp. z o.o., Poznań.
- SZŁĄZAK N., OBRACAJ D., BOROWSKI M., SWOLKIEŃ J. 2009b - Methods for improving thermal work conditions in Polish coal mines. Ninth International Mine Ventilation Congress, Oxford & IBH Publishing Co. Pvt. Ltd, New Delhi, 253 – 262.
- SZŁĄZAK N., OBRACAJ D., GLUCH B. 2013a - Estimation of microclimate condition in longwall excavations in hard coal mines. AGH Journal of Mining and Geoengineering; ISSN 2299-257X. Vol. 37, no. 1, 117-128.
- SZŁĄZAK N., OBRACAJ D., GLUCH B. 2013b - Warunki mikroklimatu wyrobisk chodnikowych i ścianowych na wybranym przykładzie. „Mechanizacja i Automatyza Górnictwa” nr 4, 5-16.
- SZŁĄZAK N., OBRACAJ D., PIERGIES K. 2014b - Sterowanie parametrami wody lodowej w instalacji klimatyzacji centralnej kopalń podziemnych. „Chłodnictwo & Klimatyzacja” nr 11, 58-62.
- SZŁĄZAK N., OBRACAJ D., SWOLKIEŃ J. 2016 - Controlling the distribution of coldwater in air cooling systems of underground mines. Archives of Mining Sciences. Vol. 61, iss. 4, 793-807.
- SZŁĄZAK N., OBRACAJ D., SWOLKIEŃ J. 2018a - An Evaluation of the Functioning of Cooling Systems in the Polish Coal Mine Industry. Energies 11 (9), 2267-2277.
- SZŁĄZAK N., OBRACAJ D., SWOLKIEŃ J. 2018B - Ocena i możliwości poprawy stanu zagrożenia klimatycznego w polskich kopalniach podziemnych. Agencja Wydawniczo-Poligraficzna ART-TEKST. Kraków.
- SZŁĄZAK N., OBRACAJ D. 2014a - Sposoby redukcji ciśnienia hydrostatycznego w instalacjach klimatyzacji centralnej kopalń podziemnych. Chłodnictwo ; nr 11-12, 2-6.
- SZŁĄZAK N., TOR A., ŁUKOSZ M., ZIELEŹNIK J. 2004b - Rozwiązanie klimatyzacji grupowej w KWK Zofiówka. Materiały XIII Szkoły Eksploatacji Podziemnej. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków, 513-518.
- WACŁAWIK J. 1971 - Prognoza kopalnianych warunków klimatycznych z uwzględnieniem wpływu wilgotności. Zeszyty Naukowe AGH, seria „Górnictwo”, z. 33.
- WACŁAWIK J. 2010 - Numerical model of heat exchange between a worker body and the hot environment. Archives of Mining Sciences. Vol. 55, no. 3, 573-588.

Artykuł wpłynął do redakcji – wrzesień 2019
Artykuł akceptowano do druku – 25.09.2019



THIELE®

Fabryka Łańcuchów Przenośnikowych
i Technicznych Kuźnia Matrycowa

- Łańcuchy ogniowe górnicze i ogniwa złączne
- Łańcuchy zawiesiowe i uchwyty transportowe
- Łańcuchy ogniowe nawęglane, kute i płytkowe



THIELE GmbH & Co. KG
Tel.: +49 2371-947 0

Werkstr. 3
Fax: +49 2371-947 295

58640 Iserlohn
info@thiele.de

Germany
www.thiele.de