



Wykorzystanie wody dołowej w odbiorze i wykorzystaniu ciepła skraplania z podziemnych układów klimatyzacji w kopalniach

Nikodem SZŁĄZAK¹⁾, Dariusz OBRACAJ²⁾, Marek KORZEC³⁾

¹⁾ prof. dr hab. inż.; AGH w Krakowie, Wydział Inżynierii Łądowej i Gospodarki Zasobami, Kraków, Polska; email: szlajak@agh.edu.pl, ORCID: 0000-0001-8320-4751 orcid iD

²⁾ dr hab. inż., prof. AGH; AGH w Krakowie, Wydział Inżynierii Łądowej i Gospodarki Zasobami, Kraków, Polska; email: obracaj@agh.edu.pl, ORCID: 0000-0001-5987-6718

³⁾ dr inż.; AGH w Krakowie, Wydział Inżynierii Łądowej i Gospodarki Zasobami, Kraków, Polska; email: mkorzec@agh.edu.pl, ORCID: 0000-0001-5958-3157

<http://doi.org/10.29227/IM-2023-01-28>

Submission date: 17-05-2023 | Review date: 06-06-2023

Abstrakt

Stosowanie różnych systemów chłodzenia powietrza w kopalniach podziemnych wynika z trudnych warunków klimatycznych panujących na stanowiskach pracy. Podziemne instalacje chłodnicze z agregatami sprężarkowymi są szeroko stosowane w systemach chłodzenia powietrza. Sprawne działanie agregatów chłodniczych zależy od właściwego odprowadzenia ciepła skraplania. Moc chłodnicza i lokalizacja instalacji chłodniczej mają największy wpływ na podjęcie decyzji o odprowadzeniu ciepła skraplania do powietrza lub wody. W artykule skoncentrowano się na zastosowaniu urządzeń chłodniczych zabudowanych w wyrobiskach podziemnych. Przedstawiono rozważania dotyczące ograniczeń przekazywania ciepła skraplania do powietrza kopalnianego oraz warunki sprzyjające wykorzystaniu wody dołowej w odbiorze ciepła skraplania z układów klimatyzacji. Omówiono uwarunkowania i możliwości wykorzystania ciepła odpadowego zawartego w pompowanej na powierzchnię wodzie dołowej.

Słowa kluczowe: zagrożenie klimatyczne, klimatyzacja kopalń, agregaty chłodnicze, ciepło skraplania, wykorzystanie ciepła odpadowego

1. Wprowadzenie

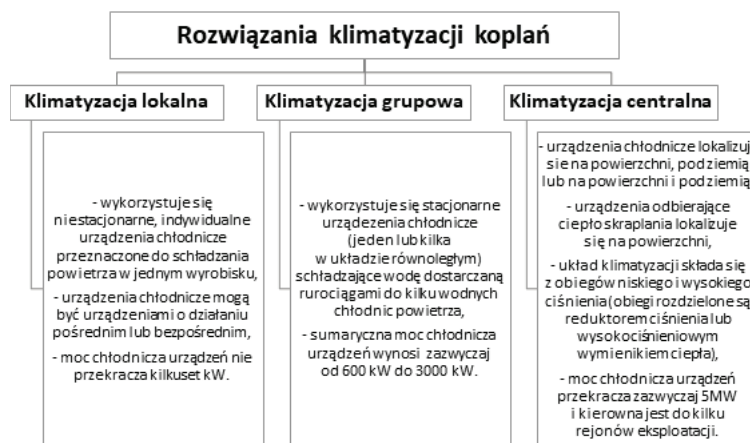
Eksploatacja w kopalniach podziemnych wiąże się z występowaniem wielu zagrożeń naturalnych. W kopalniach głębokich jednym z dominujących zagrożeń jest zagrożenie klimatyczne. Jego skala zależy od wielu czynników, które zostały przedstawione między innymi w pracach (Maurya T. i in. 2015; Szlajak i in. 2018a; Li i in. 2021, Szlajak i in. 2021). Podstawowym z nich jest temperatura pierwotna górotworu. Temperatury pierwotne górotworu zależą od głębokości i stopnia geotermicznego, który może osiągać różne wartości w zależności od lokalizacji kopalni (McPherson 2012; Doleżal i in. 2013, Hemp 2014; Kamyar 2016).

Na stan zagrożenia klimatycznego wpływa także właściwe planowanie wykonywania wyrobisk podziemnych, racjonalna wentylacja wyrobisk oraz organizacja procesu technologicznego, a przede wszystkim transportu materiałów, odstawy urobku i lokalizacji urządzeń elektrycznych. Wymienione czynniki determinują stosowanie różnych rozwiązań klimatyzacji.

W zależności od miejsca lokalizacji urządzeń chłodniczych w kopalniach można wyróżnić trzy rodzaje układów klimatyzacyjnych. Ich podział został przedstawiony na rysunku 1. O wyborze rozwiązania klimatyzacji decyduje przede wszystkim występujące zapotrzebowanie na moc chłodniczą w rejonach prowadzonych robót górniczych. Istotnym czynnikiem jest także rodzaj zastosowanych urządzeń chłodniczych, zwanych agregatami chłodniczymi, oraz możliwości odprowadzania ciepła skraplania. Opis działań związanych z projektowaniem klimatyzacji w kopalniach przedstawiono między innymi w publikacjach (Szlajak i in. 2017; Szlajak i in. 2018b).

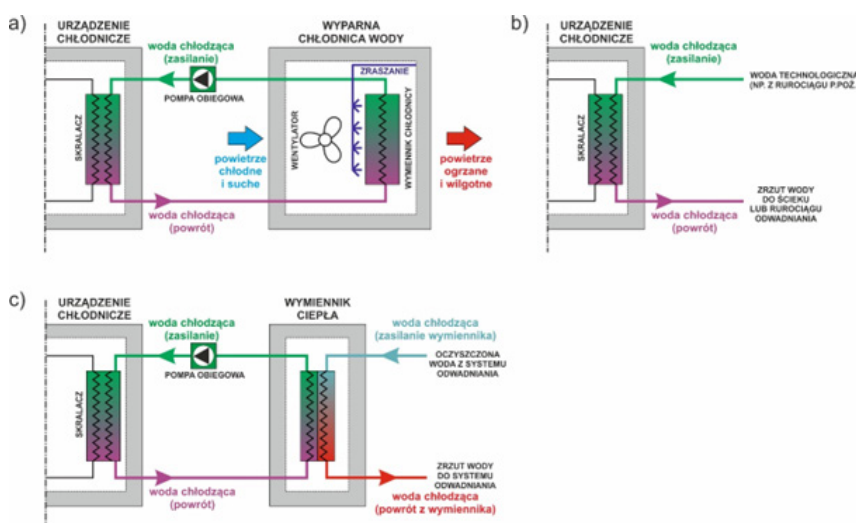
Niezależnie od zastosowanego rozwiązania klimatyzacji istotna jest kwestia odbioru ciepła skraplania czynnika chłodniczego w sprężarkowych urządzeniach chłodniczych. Odbiór ciepła skraplania może być realizowany następująco:

- W układach klimatyzacji lokalnej ciepło skraplania ze skraplaczy indywidualnych urządzeń chłodniczych pośredniego lub bezpośredniego działania oddawane jest do powietrza za pośrednictwem wody schładzanej w wyparnych chłodnicach wody (rys. 2a), wody technologicznej (np. z rurociągów p.poż. – rys. 2b) lub do wody dołowej w systemie odwadniania kopalni (rys. 2c). Bezwarunkowo woda ta musi być w sposób kontrolowany ujmowana i odpompowywana poza rejon, w którym pracują urządzenia chłodnicze.
- W układach klimatyzacji grupowej ciepło skraplania czynnika chłodniczego oddawane może być również do powietrza za pośrednictwem wody schładzanej w zgrupowanych wyparnych chłodnicach wody, najczęściej przy szybie wentylacyjnym (rys. 2a). Ciepło może być również przekazywane do wody dołowej pompowanej systemami odwadniania na powierzchnię (rys. 2c). Znane jest również rozwiązanie schładzania skraplaczy dołowych agregatów chłodniczych klimatyzacji grupowej za pomocą wody lodowej powrotną z układu klimatyzacji centralnej (Szlajak i in. 2010b).
- W klimatyzacji centralnej ciepło skraplania ze skraplaczy tych urządzeń oddawane jest na powierzchni do powietrza atmosferycznego lub do wody.



Rys. 1. Klasyfikacja rozwiązań klimatyzacji kopalń

Fig. 1. Mine cooling systems classification



Rys. 2. Sposoby odprowadzenia ciepła skraplania z urządzeń chłodniczych zabudowanych w wyrobiskach dołowych: a) odprowadzenie do powietrza w wyparnych chłodnicach wody, b) odprowadzenie do wody technologicznej, c) odprowadzenie do wody dołowej za pośrednictwem wymiennika ciepła

Fig. 2. Ways of removing condensation heat from underground refrigeration plants: a) removing to the air using evaporative water coolers, b) removing to the service water, c) removing to the dewatering system in heat exchangers

Wykorzystanie wody dołowej do chłodzenia skraplaczy urządzeń chłodniczych rozważa się najczęściej w kontekście zastosowania układów klimatyzacji lokalnej i grupowej. Do tej pory w Polsce stosowano podziemne instalacje wyposażone w sprężarkowe urządzenia chłodnicze lokalizowane w wyrobiskach kopalni, o ile zapotrzebowanie na moc chłodniczą zwykle nie przekraczało 2,0–3,0 MW (Szlązak i in. 2019b). Podziemnych stacji klimatyzacji z wyższą mocą chłodniczą nie budowano, ponieważ praktycznie niemożliwe było odprowadzenie większej ilości ciepła skraplania czynnika chłodniczego.

W jednej z podziemnych kopalń zbudowano system klimatyzacji z odprowadzeniem ciepła skraplania z podziemnych urządzeń chłodniczych na powierzchnię za pomocą rurociągów w szybie wdechowym. Jednak koszty eksploatacyjne spowodowały, że taki system nie został szerzej rozpozszechniony (Szlązak i in. 2018). Dlatego przy zapotrzebowaniu dużych mocy chłodniczych (powyżej 3,0 MW) zwykle rozpatruje się budowę klimatyzacji centralnej z powierzchniowymi stacjami urządzeń chłodniczych. W takich układach klimatyzacyjnych niezbędne jest zastosowanie rozwiązań obniżających ciśnienie hydrostatyczne słupa wody pomiędzy

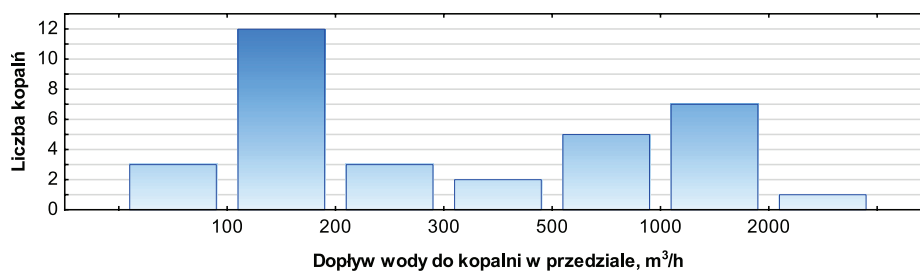
rurociągiem pionowym w szybie, a rurociągami na poziomie głębokościowym kopalni.

Nie mniej jednak można rozważyć budowę podziemnej stacji urządzeń chłodniczych z większą mocą chłodniczą. Aktualnie w jednej z kopalń budowany jest układ klimatyzacji o mocy 4,0 MW, z planem rozbudowy do 6,0 MW, w którym ciepło skraplania z urządzeń chłodniczych odprowadzane będzie do systemu odwadniania kopalni (Projekt dla CFT). Takie rozwiązanie musi spełniać kilka kluczowych warunków, aby w sposób skuteczny i ekonomiczny eksploatować układ klimatyzacyjny w kopalni.

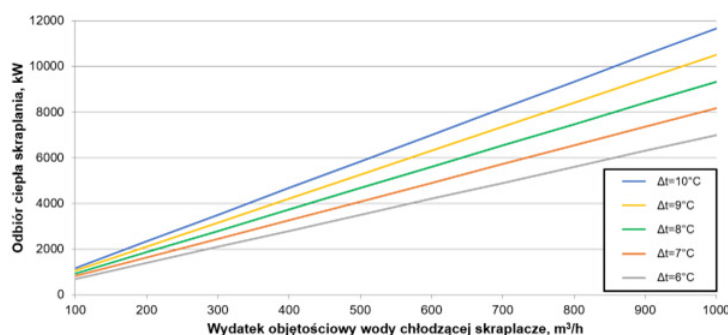
2. Ograniczenia dotychczasowych sposobów przekazywania ciepła skraplania z podziemnych urządzeń chłodniczych

W układach klimatyzacji z urządzeniami chłodniczymi zabudowanymi w wyrobiskach podziemnych możliwości oddawania ciepła skraplania do powietrza wentylacyjnego są ograniczone. Wynika to z parametrów termodynamicznych powietrza przepływającego wyrobiskami górnymi.

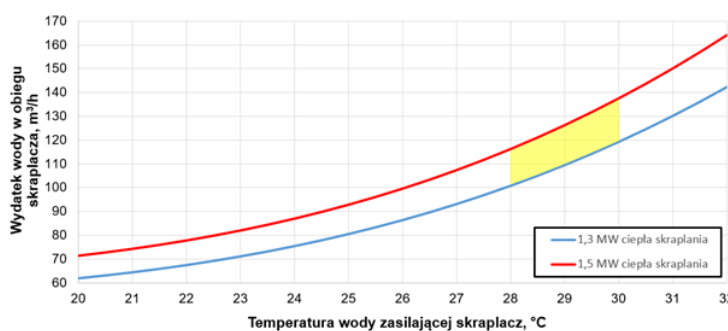
Z dotychczasowych doświadczeń związanych ze stosowaniem podziemnych urządzeń chłodniczych i oddawaniem ciepła do powietrza wynika, że:



Rys. 3. Rozkład dopływu wody do polskich kopalń podziemnych
Fig. 3. Distribution of water inflow in Polish underground mines



Rys. 4. Możliwości odbioru ciepła skraplania w zależności od wydatku wody i różnicy temperatur wody chłodzącej
Fig. 4. Possibilities of recovering condensation heat depending on the water flow rate and the temperature difference of the cooling water



Rys. 5. Wymagany wydatek wody chłodzącej skraplacze w zależności od temperatury wody zasilającej
Fig. 5. Required cooling water flow for condensers depending on the water temperature

- Odbiór ciepła skraplania jest kluczowy dla uzyskania w urządzeniach chłodniczych pełnej mocy chłodniczej, a tym samym poprawnej pracy całego układu klimatyzacyjnego;
- Przekazywanie ciepła skraplania do powietrza wiąże się bardzo często z koniecznością zabudowy chłodnic wyparnych w znacznej odległości od urządzeń chłodniczych, a tym samym zabudową długich rurociągów i pomp obiegowych dla pokonania oporów przepływu wody;
- Wyparne chłodnice wody muszą być wyposażane w wentylatory przetłaczające powietrze wentylacyjne przez wymienniki ciepła, co zwiększa energochłonność układu klimatyzacyjnego;
- Temperatura powietrza wentylacyjnego nie powinna przekraczać 27°C a wilgotność względna 75%;
- Strumień objętości powietrza dostosowany musi być do wielkości przekazywanego do powietrza strumienia ciepła.

Takie wymagania na drogach powietrza odprowadzanego do szybów wentylacyjnych ograniczają możliwości lokalizacji

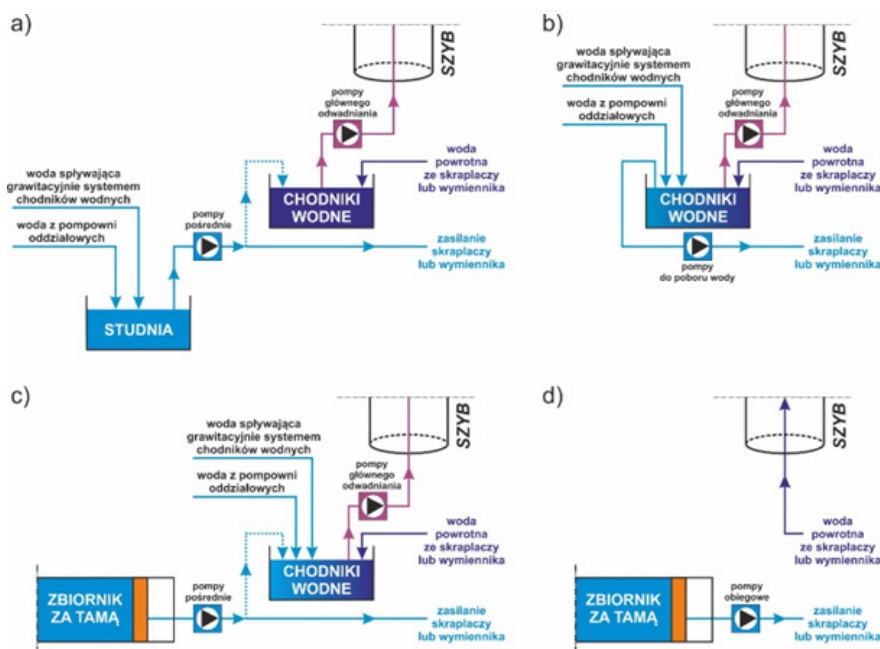
wyparnych chłodnic wody o dużych mocach chłodniczych. Nie zawsze jest więc możliwe schłodzenie wody do wymaganej temperatury na wlocie skraplacza urządzenia chłodniczego.

Kopalnie w schładzaniu skraplaczy bardzo często wspomagają się wodą technologiczną (z rurociągów p.poz.). Jednakże jest to rozwiązanie nieuzasadnione ekonomicznie i przyczynia się do zwieszania zużycia wody. Dodatkowo, znaczne zwiększenie zużycia wody może być realizowane jeśli system odwadniania kopalni posiada rezerwy zwiększenia wydajności.

3. Czynniki warunkujące wykorzystanie systemu odwadniania kopalni w układach klimatyzacyjnych

W kopalniach występują dwa główne źródła wody dołowej. Całkowity dopływ wody do wyrobisk związany jest z dopływem wody pochodzenia naturalnego jak i z dopływem wody technologicznej. W polskich kopalniach zużycie wody technologicznej jest stosunkowo niewielkie w stosunku do całkowitej ilości wody odpompowywanej na powierzchnię.

Głównym zadaniem całego systemu odwadniania kopalni jest ujęcie dopływów wody możliwie blisko ich powstawania



Rys. 6. Rozwiązania poboru wody do chłodzenia skraplaczy urządzeń chłodniczych z systemu odwadniania: a) rozwiązanie z układem pośrednim, b) układ bezpośredni, c) rozwiązanie poboru wody z za tamy z układem pośrednim, d) rozwiązanie poboru wody z za tamy z bezpośredniego pompowania wody na powierzchnię

Fig. 6. Solutions of intake water for cooling condensers from the dewatering system: a) indirect system, b) direct system, c) water intake from behind the dam with indirect system, d) water intake from behind the dam with direct pumping of water to the surface

i odprowadzanie na powierzchnię kopalni. W kopalniach większość wody sływa grawitacyjnie z miejsc prowadzenia eksploatacji do centralnej komory pomp odwadniania. Pozostała część wody jest przepompowywana. Kluczową rolę w całym systemie odwadniania stanowią chodniki wodne i komory głównego odwadniania.

Woda z wyrobisk gromadzących wodę może być przelaczana na powierzchnię pośrednio (dwa lub wielostopniowo) lub bezpośrednio. Sposób odpompowywania wody w kopalni zależy od jej dopływu oraz liczby czynnych poziomów wydobywczych. W warunkach polskich kopalń przy dużych dopływach wody stosuje się przede wszystkim system bezpośredniego odprowadzania wody na powierzchnię (Praca zbiorowa 1975). W systemie odwadniania pośredniego woda przekazywana jest między poziomami głębokościowymi, a następnie na powierzchnię. Komory głównego odwadniania w takiej sytuacji lokalizuje się na poziomie o największym dopływie wody. Pomiędzy poziomami woda może sływać grawitacyjnie lub być przepompowywana.

Możliwości odprowadzenia ciepła skraplania w układach odwadniania kopalń ogranicza ilość wody w systemie odwadniania kopalni. Polskie kopalnie podziemne należą generalnie do kopalń o małym dopływie wody. Charakteryzują się także zróżnicowaną ilością wody w systemie odwadniania. W roku 2022 w Polsce eksploatacja prowadzona była w 20 kopalniach węgla kamiennego, w 30 ruchach oraz z 3 kopalniach rud miedzi. Dopływy wody w tych kopalniach zmieniają się w szerokich granicach, od około $10 \text{ m}^3/\text{h}$ do ponad $3500 \text{ m}^3/\text{h}$ (Sas 2022). Średni dopływ wynosi około $600 \text{ m}^3/\text{h}$. Struktura dopływu wody jest jednak różna, co wpływa na to, że bardzo często woda odpompowywana jest z różnych rejonów kopalni oraz różnych poziomów co uniemożliwia jej całkowite wykorzystanie w układach klimatyzacji. Na rysunku 3 przedstawiono histogram liczby kopalń z różnymi dopływami wody.

W przypadku kopalń wieloruchowych, uwzględniono dopływy do poszczególnych ruchów.

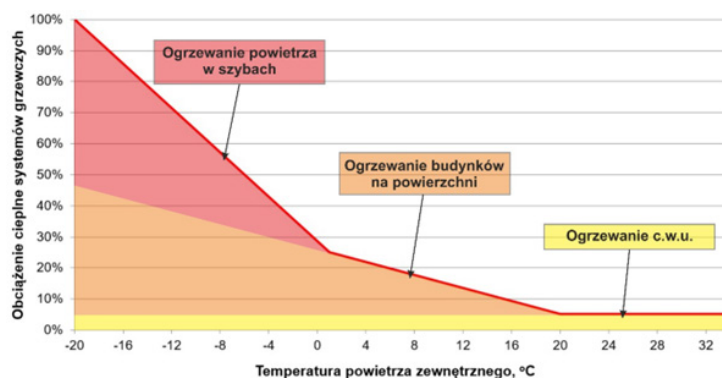
W kopalniach o dużym dopływie wód dołowych można zwrócić uwagę na możliwość ich wykorzystania w odbiorze ciepła skraplania z dołowych urządzeń chłodniczych. Przy rozpatrywaniu takiego sposobu należy jednak rozważyć dostępny strumień wody kopalnianej oraz jej jakość i czystość.

W kontekście wykorzystania wody dołowej w układach klimatyzacji, najważniejszymi czynnikami są:

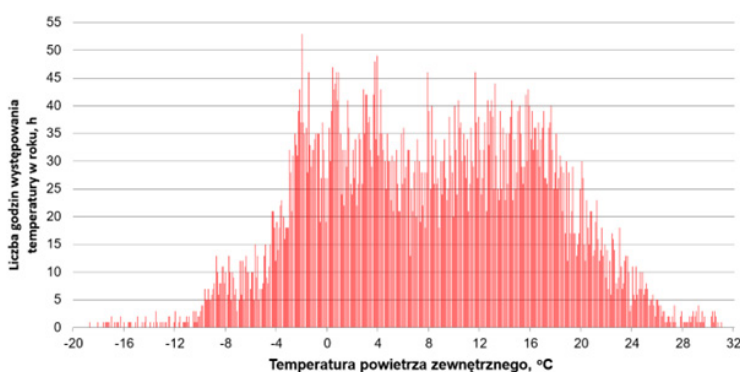
- ciągłość pompowania wody na powierzchnię,
- maksymalny dopływ wody i jego zmienność w czasie,
- lokalizacja chodników wodnych i komór głównego odwadniania względem planowanej lokalizacji urządzeń chłodniczych,
- skład chemiczny wody i poziom jej zanieczyszczenia częściami stałymi,
- struktura rozpyłu wody w systemie odwadniania rozumiana jako:
 - liczba miejsc pompowania wody – komora głównego odwadniania i lokalne przepompownie wody,
 - sposób pompowania wody na powierzchnię – bezpośredni, pośredni,
- możliwość poboru wody poza miejscem jej odpompowywania na powierzchnię (występowanie zbiorników pośrednich).
- temperatura wody i jej zmienność w czasie.

Biorąc pod uwagę powyższe czynniki należy mieć na uwadze, że nie każda kopalnia ma warunki do wykorzystywania wody dołowej jako medium chłodzącego skraplacze urządzeń chłodniczych. Tylko szczegółowa analiza powyższych czynników pozwala określić potencjał takiego rozwiązania.

Na rysunku 4 przedstawiono wielkości strumieni ciepła jakie można oddać do wody w zależności od jej wydatku ob-



Rys. 7. Zmiana obciążenia cieplnego systemów grzewczych w kopalni w zależności od temperatury powietrza zewnętrznego
 Fig. 7. Changes of heat requirements of the heating systems in the mine depending on the outside air temperature



Rys. 8. Częstość występowania temperatur dla miejscowości Katowice
 Fig. 8. Frequency of outside air temperatures in Katowice

jętościowego oraz różnicy temperatur przy przepływie przez skraplacze. Z przedstawionego wykresu wynika, że dla odbioru ciepła z układów o większej mocy niezbędne jest zapewnienie dużego wydatku wody chłodzącej w miejscu lokalizacji urządzeń, co w warunkach kopalń podziemnych często nie jest zapewnione. Z przedstawionego na rysunku 4 wykresu wynika, że dla odebrania większych ilości ciepła skraplania (w domyśle z układów większej mocy) wody musi być dużo lub trzeba zakładać dużą różnicę temperatur Δt wody zasilającej i powrotnej na skraplaczach. W większości dostępnych na rynku urządzeń chłodniczych woda zasilająca skraplacz powinna mieć od 28-30°C, a w czasie przepływu przez skraplacz ogrzewa się ona o 8-10°C. Takie założenia wskazują, że dla odbiorów dużych ilości ciepła skraplania wymagany jest duży wydatek wody.

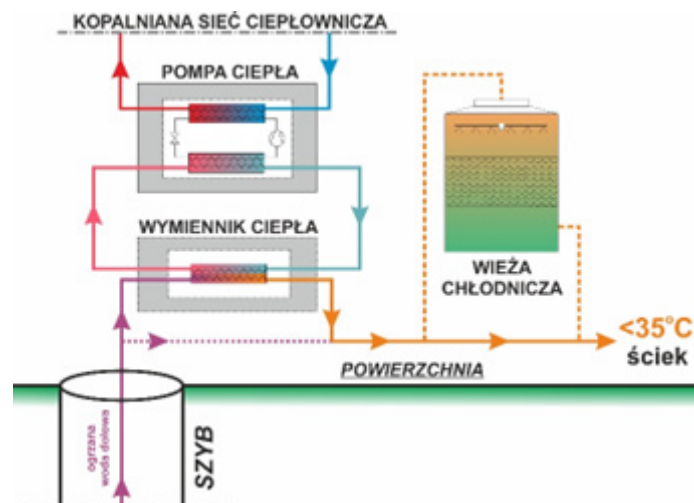
Woda w systemie odwadniania bardzo często zawiera zanieczyszczenia i najczęściej nie może być w sposób bezpośredni wykorzystana do chłodzenia skraplaczy, gdyż spowodowałaby ich szybkie zanieczyszczenie. Woda taka może być zastosowana z wykorzystaniem wymienników ciepła wody dołowej pośredniczących w wymianie ciepła. Kolejnym czynnikiem, który może ograniczać potencjał wody dołowej jest jej temperatura zależna od głębokości, na której zlokalizowane są chodniki wodne i występująca tam temperatura górotworu. Wahania temperatury wody mogą być związane także ze zmiennością temperatury powietrza w ciągu roku. W przypadku, gdy temperatura wody będzie zbyt wysoka, to nie zapewni ona odbioru wymaganej ilości ciepła skraplania przy ustalonym przepływie. Na rysunku 5 przedstawiono wykres obrazujący zmiany wymaganego wydatku wody

do chłodzenia skraplaczy wraz ze zmianą temperatury wody zasilającej skraplacz. Wykres opracowano na podstawie wyników pomiarów w różnych urządzeniach sprężarkowych o mocach skraplaczy w zakresie od 1,3 MW do 1,5 MW. Obszar żółty oznacza zakres wydatku wody niezbędny do chłodzenia skraplaczy dla popularnych w kopalniach urządzeń chłodniczych z typowymi czynnikami chłodniczymi. Na wykresie można zauważyć, że przy wzroście temperatury wody chłodzącej, dla zachowania pełnej wydajności chłodniczej urządzenia należy zapewnić zdecydowanie wyższy wydatek wody.

Skład wody i jej zanieczyszczenie są równie istotne jak temperatura w jej wykorzystywaniu do celów chłodniczych (Szlązak i in. 2010a).

Woda może być kierowana na różnego rodzaju wymienniki ciepła pośredniczące w wymianie ciepła pomiędzy wodą dołową, a układem skraplacza urządzenia chłodniczego. Woda może być kierowana bezpośrednio na skraplacz. Kwestia konieczności zastosowania wymiennika ciepła będzie zależała przede wszystkim od składu chemicznego wody oraz zawartości części stałych i/lub zawiesin. W instalacji poboru wody dołowej należy dobrać odpowiednie urządzenia filtrujące i/lub uzdatniające wodę.

Istotnym aspektem analizy wykorzystania wody dołowej jest obliczenie jej temperatury przy odpompowaniu na powierzchnię (aspekty prawne związane ze zrzutem wód do ścieków). W przypadku zabudowy rurociągów odwadniających w szybach wdechowych może dochodzić do ogrzewania powietrza doprowadzanego do wyrobisk. Istotne są również warunki środowiskowe zrzutu ciepłych wód. Odzysk ciepła z ciepłej wody powinien być wzięty pod uwagę podczas ana-



Rys. 9. Idea pozyskiwania ciepła odpadowego z wody pompowanej systemem odwadniania na powierzchni
 Fig. 9. Idea of waste heat recovery from water pumped to the surface by the dewatering system

lizy rozpatrywania wykorzystywania wody dołowej do celów chłodniczych.

4. Przykłady rozwiązań wykorzystania wody dołowej w chłodzeniu skraplaczy układów klimatyzacji

Istotnym czynnikiem warunkującym możliwości wykorzystania wody dołowej do chłodzenia skraplaczy maszyn chłodniczych jest rozwiązanie systemu odwadniania. Na rysunku 6 przedstawiono przykłady rozwiązań wykorzystywania wody dołowej:

W rozwiązaniu przedstawionym na rysunku 6a woda z rejonów gromadzona jest w zbiorniku (np. studni), z którego jest przepompowywana do chodników wodnych. Pobór wody do chłodzenia agregatów realizowany jest z obiegu pomiędzy zbiornikiem, a chodnikami wodnymi. Woda ogrzana kierowana jest do chodników wodnych. Pompy głównego odwadniania pobierają wodę z chodników wodnych i odprowadzają na powierzchnię.

W rozwiązaniu przedstawionym na rysunku 6b woda kierowana jest z rejonów bezpośrednio do chodników wodnych. Pobór wody do chłodzenia agregatów realizowany jest z najczęściej z jednego z chodników, a ogrzana woda jest kierowana do drugiego chodnika. Pompy głównego odwadniania pobierają wodę z chodników wodnych i odprowadzają na powierzchnię. Strumień wody pobieranej do chłodzenia skraplaczy i przekazywanej z powrotem do chodników wodnych powinien być mniejszy od strumienia wody dopływającej do systemu odwadniania kopalni.

W rozwiązaniu przedstawionym na rysunku 6c wykorzystuje się wodę z otamowanymi zbiornikami wodnymi w kopalni. Pobór wody do chłodzenia agregatów realizowany jest z tamy wodnej, a ogrzana woda kierowana jest do chodników wodnych. Pompy głównego odwadniania pobierają wodę z chodników wodnych i odprowadzają na powierzchnię.

W rozwiązaniu przedstawionym na rysunku 6d woda z rejonów gromadzona jest w otamowanym wyrobisku. Pobór wody do chłodzenia agregatów realizowany jest z tamy wodnej, a ogrzana woda jest kierowana bezpośrednio na powierzchnię.

W perspektywie wykorzystania wody do chłodzenia skraplaczy najlepsze jest rozwiązanie z układem pośrednim (rys. 6a). W takim rozwiązaniu woda pobierana do chłodzenia

skraplaczy i oddawana po ogrzaniu do chodników wodnych nie miesza się z wodą spływającą z rejonów. W przypadku układu bezpośredniego (rys. 6b) woda pobierana jest z chodników wodnych i po ogrzaniu w skraplaczach kierowana również do chodników wodnych. Nawet jeżeli są to dwa równoległe chodniki będzie dochodziło do jej mieszania i wzrostu temperatury wody w chodnikach. Warunki odbioru ciepła w skraplaczach będą się pogarszać w czasie utrudniając uzyskanie przez urządzenia chłodnicze pełnej wydajności. Dobrym rozwiązaniem jest także pobór wody z tam wodnych w wyrobiskach. W zależności od warunków woda pobrana z tam, po ogrzaniu w agregatach może być kierowana do chodników wodnych (rys. 6c) lub pompowana bezpośrednio na powierzchnię (rys. 6d).

5. Parametry wody na powierzchni

Zgodnie z polskim ustawodawstwem pod pojęciem ścieków rozumie się między innymi wprowadzane do wód lub do ziemi wody pochodzące z odwodnienia zakładów górniczych, z wyjątkiem wód wtłaczanych do górotworu (Ustawa... 2017). Podmiot korzystający z usług wodnych wprowadzający ścieki do wód lub do ziemi w ramach usług wodnych jest obowiązany do stosowania przyrządów pomiarowych lub systemów pomiarowych umożliwiających pomiar ilości i temperatury wprowadzonych ścieków, jeżeli wprowadza do wód lub do ziemi ścieki w ilości średniej dobowej powyżej 0,01 m³/s.

Ścieki zbliżone składem do ścieków przemysłowych, powstające w wyniku działalności innej niż działalność handlowa, przemysłowa, składowa, transportowa lub usługowa albo ścieki przemysłowe będące mieszaniną ścieków bytowych, wód z odwodnienia zakładów górniczych, wód chłodniczych, lub ścieków pochodzących ze stacji uzdatniania wody, a także wód opadowych i roztopowych mogą być wprowadzane do ziemi jedynie w sytuacjach, gdy zastosowanie dostępnych technik w zakresie wprowadzania ścieków do wód jest niemożliwe lub ekonomicznie nieuzasadnione, pod warunkiem że temperatura wód chłodniczych przed zmieszaniami ze ściekami bytowymi, wodami z odwodnienia zakładów górniczych, wodami opadowymi lub roztopowymi lub ściekami pochodzącymi ze stacji uzdatniania wody nie jest wyższa niż 35°C (Rozporządzenie... 2019).

Temperatura wody odpompowanej na powierzchnię kopalni będzie zależna od temperatury powietrza wprowadzanego do szybu oraz od temperatury wody pompowanej na powierzchnię.

Woda opuszczająca skraplacze agregatów chłodniczych, w zależności od typu zastosowanego agregatu może osiągać nawet powyżej 40°C. Woda o takich parametrach może więc być pompowana na powierzchnię. Wynika z tego, że okresowo temperatura wody pompowanej na powierzchni może przekraczać 35°C (Szlązak, Swolkień 2019; Szlązak i in. 2022), co będzie skutkowało tym, że będzie musiała być chłodzona przed zrzutem do ścieku. Stwarza to korzystne warunki do zagospodarowania ciepła w niej zawartego na powierzchni. Zamiast ochładzać wodę w zbiornikach, czy też chłodniach wentylatorowych można ją wykorzystać dla potrzeb energetycznych zakładu poprzez układy do odzysku ciepła niskotemperaturowego.

6. Wykorzystanie ciepła zawartego w wodzie dołowej

Oddawanie ciepła skraplania do systemu odwadniania kopalni daje możliwość jego wykorzystania na powierzchni. Oddawanie ciepła skraplania do wody pompowanej na powierzchnię powoduje podwyższenie jej temperatury, co z kolei podnosi jej potencjał energetyczny i pozwala na jej energetyczne wykorzystanie, np. do celów grzewczych w kopalni (ogrzewanie cwu, ogrzewanie budynków, ogrzewania powietrza wlotowego w szybach wdechowych). Ciepło to może zostać wykorzystane bezpośrednio lub poprzez zastosowanie układów z pompami ciepła lub wykorzystanie układów ORC. Należy też podkreślić, że okresowo woda posiadać może zbyt wysoką temperaturę, aby mogła być zrzucana do ścieku, więc tym bardziej zasadne jest wykorzystanie ciepła w niej zawartego.

Zakłady górnicze cechują się dużym zapotrzebowaniem na energię cieplną, zarówno w wyrobiskach dołowych, jak również na powierzchni. Istnieje wiele możliwości wykorzystania ciepła odpadowego celem pokrycia tych potrzeb. Bardzo często w kopalniach rozważa się wykorzystanie ciepła odpadowego z różnych procesów. Trudności polegają jednak na skorelowaniu ilości i ciągłości parametrów ciepła odpadowego z potrzebami energetycznymi zakładu.

Kierunki wykorzystania ciepła odpadowego na powierzchni zakładu mogą być różne. Najbardziej możliwie jest zagospodarowanie ciepła do celów:

- Ogrzewania cieplej wody użytkowej – zapotrzebowanie stałe w ciągu roku, a wymagana temperatura wody powinna wynosić minimum 55°C;
- Ogrzewania powietrza w szybach wdechowych – zapotrzebowanie zmienne w ciągu roku, występuje kiedy temperatura powietrza zewnętrznego spada poniżej 1°C, a wymagana temperatura czynnika grzewczego zależna jest od konstrukcji układu narzewnic;
- Ogrzewania budynków na powierzchni – zapotrzebowanie tylko sezonie grzewczym i zależy od temperatury powietrza zewnętrznego, a wymagana temperatura czynnika grzewczego zależna od typu systemu ogrzewania.

Instalacja cwu zapewnia potrzeby bytowe i technologiczne użytkowników obiektów powierzchniowych. Największe

zużycie cwu dotyczy łaźni pracowniczych, warsztatów działowych oraz potrzeb bytowych obiektów biurowych. W kopalni można przyjąć, że obciążenie cieplne układu cwu jest stałe w ciągu roku.

Zapotrzebowanie na ciepło do ogrzewania powietrza w szybie zależy od temperatury powietrza zewnętrznego i wydatku powietrza nim doprowadzanego do kopalni. Powietrze powinno być ogrzewane do wymaganej przepisami temperatury 1°C (Rozporządzenie... 2017). Zmiana temperatury powietrza zewnętrznego zmienia się w ciągu roku wpływając na obciążenie cieplne wymagane w układzie ogrzewania powietrza w szybach.

W przypadku budynków na powierzchni obciążenie cieplne jest również zależne od zmian temperatury zewnętrznej.

Szczytowe obciążenie cieplne występuje przy najniższych temperaturach powietrza występujących w danym rejonie i jest krótkotrwałe w ciągu roku. Wraz ze wzrostem temperatury powietrza zewnętrznego obciążenie cieplne maleje, co przedstawiono na rysunku 7.

Przedstawiony na rysunku 7 wykres nie obrazuje jednak zapotrzebowania na ciepło, a jedynie zmienność obciążenia cieplnego. Dlatego dla dokładniejszej analizy należy uwzględnić zmienność temperatur w ciągu roku. Na rysunku 8 przedstawiono wykres częstości występowania temperatur powietrza zewnętrznego wg danych statystycznych dla stacji metrologicznej w Katowicach (Serwis Rzeczypospolitej Polskiej 2017). Z przedstawionego wykresu wynika, że bardzo niskie temperatury powietrza występują stosunkowo rzadko, a wtedy obciążenia cieplne systemów grzewczych są największe.

Wymagania powierzchniowych instalacji grzewczych powodują, że temperatura wody pompowanej systemem odwadniania na powierzchnię jest zbyt niska i nie pozwala na jej bezpośrednie wykorzystanie nawet po przekazaniu do niej ciepła z agregatów chłodniczych. Dlatego też dla wykorzystania ciepła odpadowego w niej zawartego można rozważyć zastosowanie pomp ciepła typu woda/woda. W przypadku układów z pompami ciepła należy szczególnie mieć na uwadze wymagania temperatury górnego źródła ciepła, czyli zasilania sieci ciepłowniczych. Generalnie im niższa wymagana temperatura tym wyższa ich efektywność. W rozwiązaniach przemysłowych znane są jednak rozwiązania wysokotemperaturowych pomp ciepła, które pozwalają uzyskać temperatury powyżej 60°C (Wang i in. 2019). Z uwagi na możliwe zanieczyszczenia wody, a tym samym ochrony parowników pomp ciepła zaleca się stosować wymienniki pośredniczące w wymianie ciepła. Znane są rozwiązania odzysku ciepła z wody kopalnianej za pomocą pomp ciepła w kopalniach, między innymi w Tauron Wydobycie czy KGHM S.A. (Sas 2022). Na wypadek braku odbioru ciepła z systemu odwadniania za pomocą pomp ciepła należy przewidzieć konieczność ochłodzenia wody przed zrzutem do ścieku. Schemat ideowy rozwiązania pozyskiwania ciepła odpadowego z wody kopalnianej za pomocą pomp ciepła na powierzchni przedstawiono na rysunku 9.

Inną możliwością wykorzystania niskotemperaturowego ciepła odpadowego z wody kopalnianej jest zastosowanie układów ORC, w których źródła ciepła niskotemperaturowego są wykorzystywane do wytworzenia energii elektrycznej, lub do wytwarzania zarówno energii elektrycznej, jak

i czynnika grzewczego (CHP) w procesach przemysłowych (Ryms 2011; Kajurek, Rusowicz 2017; Głodek-Bucyk 2021). Dysponując pełną i dokładną inwentaryzacją gospodarki energii w danej kopalni z uwzględnieniem zidentyfikowanych strat energetycznych, można rozważyć lokalne wykorzystanie ORC do odzysku ciepła z wody kopalnianej.

Wykorzystanie ciepła odpadowego z podgrzanej wody systemu głównego odwadniania kopalni poprzedzone musi być analizą techniczno-ekonomiczną z uwzględnieniem możliwości finansowania inwestycji ze źródeł zewnętrznych.

7. Podsumowanie

Wykorzystanie wody kopalnianej w podziemnych urządzeniach chłodniczych małej mocy jest znane. Przedstawione rozwiązania pozwalają na większy zakres odprowadzania ciepła skraplania w układach klimatyzacji grupowej do wody kopalnianej. Korzystne warunki do wykorzystania wody dołowej w układzie klimatyzacji to:

- Lokalizacja urządzeń chłodniczych w sąsiedztwie wyrobisk głównego systemu odwadniania kopalni.
- Temperatura wody nie przekraczająca 32°C przy wydatku określonym odbiorem wymaganego strumie-

nia ciepła skraplania z agregatów chłodniczych.

- Możliwość poboru wody w miejscu innym niż późniejszy jej zrzut w systemie głównego odwadniania kopalni, tak aby nie dochodziło do jej mieszania.
- Możliwość odzysku ciepła z ogrzanej wody kopalnej na powierzchni kopalni.

Oddanie ciepła skraplania z urządzeń chłodniczych do głównego odwadniania kopalni będzie prowadzić do podwyższenia temperatury wody odpompowywanej na powierzchnię. Bezpośredni zrzut wody do cieków powierzchniowych może być utrudniony z uwagi na jej zbyt wysoką temperaturę. Stwarza to jednak korzystne warunki dla zastosowania rozwiązań odzysku niskotemperaturowego ciepła odpadowego z wykorzystaniem wysokotemperaturowych pomp ciepła lub konwersji energii za pomocą układów ORC. Potencjał energetyczny ciepła odpadowego z wody dołowej pozwoliłby na pokrycie części potrzeb energetycznych zakładu na powierzchni.

Projekt badawczy finansowany ze środków programu „Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza” w AGH oraz subwencji nr 16.16.100.215

Literatura – References

1. Doleżał L., Knechtel J., Taufer A., Trávníček L. 2013 – Primary Rock Temperature Fields in Czech and Polish Part of the Upper of the Upper Silesian Coal Basin. *Archives of Mining Sciences*, vol. 58, no. 1, s. 55–72
2. Głodek-Bucyk E. 2021 – Możliwość wykorzystania ciepła odpadowego w przemyśle mineralnym. *Szkło i Ceramika*, r. 72, nr 1, s. 25–27
3. Hemp R. 2014 – Sources of Heat in Mines, in *Ventilation and Occupational Environment Engineering in Mines* (third edition, chapter 32). Editor DU PLESSIS J. J. L., Mine Ventilation Society of South Africa: Johannesburg, s. 406–440
4. Kajurek J., Rusowicz A. 2017 – Zastosowanie organicznego obiegu Rankine'a (ORC) zasilanego niskotemperaturowymi źródłami ciepła do produkcji energii elektrycznej. *Aparatura Badawcza i Dydaktyczna*, t. 22, nr 3, s. 159–173
5. Kamyar A., Aminossadati S.M., Leonardi C., Sasmito A. 2019 – Current Developments and Challenges of Underground Mine Ventilation and Cooling Methods. *Proceedings of the 2016 Coal Operators' Conference, Mining Engineering, University of Wollongong, Australia, 18–20 February 2019*
6. Li Z., Xu Y.U., Li R., Jia M., Wang Q., Chen Y., Cai R., Han, Z. 2021 – Impact of the water evaporation on the heat and moisture transfer in a high-temperature underground roadway. *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 28, 101551
7. Maurya T., Kailash K., Vardhan H., Aruna M., Raj G.M. 2015 – Potential Sources of Heat in Underground Mines – A Review. *Procedia Earth and Planetary Science*, vol. 11, s. 463–468
8. McPherson M.J., 2012 – *Subsurface ventilation and environmental engineering* (Chapter 17). Springer Science & Business Media, New Delhi
9. Obracaj D., Szlązak N., Korzec M. 2022 – Using a mine dewatering system to increase cooling capacity and energy recovery of underground refrigeration plant: a case study. *Energies*, vol. 15, iss. 24, art. no. 9481, s. 1–15
10. Praca zbiorowa, 1975 – *Poradnik Górnika*, tom II. Wydawnictwo Górniczo-Hutnicze
11. Praca zespołowa pod kierunkiem prof. Nikodema Szlązaka, 2019 – Projekt klimatyzacji grupowej o mocy chłodniczej 6,0 MW dla Oddziału KWK Ruda Ruch Halemba (niepublikowana)
12. Rozporządzenie Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z dnia 12 lipca 2019 r. w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego oraz warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu do wód lub do ziemi ścieków, a także przy odprowadzaniu wód opadowych lub roztopowych do wód lub do urządzeń wodnych (Dz.U. 2019 poz. 1311 wraz z późniejszymi zmianami)
13. Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych (Dz.U. 2017, poz. 1118 wraz z późniejszymi zmianami)
14. Ryms M. 2011 – *Konwersja średnio- i niskotemperaturowego ciepła odpadowego w energię elektryczną w instalacjach przemysłowych*. Ropzrawa doktorska, Politechnika Gdańska
15. Sas S., 2022 – *Ocena możliwości obniżenia zużycia energii pierwotnej w ogrzewaniu powietrza wlotowego do kopalni*. Ropzrawa doktorska, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
16. *Serwis Rzeczypospolitej Polskiej 2023 – Typowe lata meteorologiczne i statystyczne dane klimatyczne do obliczeń energetycznych budynków*, dostęp on line (10.02.2023): <https://www.gov.pl/web/archiwum-inwestycje-rozwoj/dane-do-obliczen-energetycznych-budynkow>
17. Szlązak N., Obracaj D., Swolkień J. 2010a – Parametry wody i ich szkodliwy wpływ na instalacje klimatyzacyjne. *Prace Naukowe GIG, Górnictwo i Środowisko, Główny Instytut Górnictwa*, nr 1/1, s. 264–278
18. Szlązak N., Obracaj D., Borowski M. 2010b – Możliwości rozbudowy klimatyzacji grupowej w kopalni podziemnej. *Wiadomości Górnicze*, 61, nr 9, s. 536–543
19. Szlązak N., Obracaj D., Korzec M., Swolkień J. 2017 – Wspomaganie projektowania klimatyzacji z wykorzystaniem programu KlimaSystem. *Aktualny stan zagrożeń aerologicznych w polskich kopalniach*, pod red. Nikodema Szlązaka, Agencja Wydawniczo-Poligraficzna ART-TEKST, s. 119–138, ISBN: 978-83-7783-176-2
20. Szlązak N., Obracaj D., Swolkień J. 2018a – Ocena i możliwości poprawy stanu zagrożenia klimatycznego w polskich kopalniach podziemnych. *Agencja Wydawniczo-Poligraficzna ART-TEKST*, ISBN: 978-83-7783-198-4
21. Szlązak N., Obracaj D., Korzec M., Swolkień J. 2018b – Projektowanie systemów klimatyzacji kopalń przy zastosowaniu programu KlimaSystem. *Systemy Wspomagania w Inżynierii Produkcji*, vol. 7, iss. 1, s. 377–393
22. Szlązak N., Swolkień J. 2019a – Możliwości wykorzystania wody dołowej do odprowadzenia ciepła odebranego od powietrza kopalnianego. *Wybrane zagrożenia aerologiczne w polskich kopalniach*, pod red. nauk. Waclawa Dziurzyńskiego, 10. Szkoła Aerologii Górniczej, 16–19 września 2019, Stryszawa, s. 95–104, ISBN: 978-83-953913-2-3

23. Szlązak N., Obracaj D., Swolkień J. 2019b – Systemy klimatyzacji wyrobisk górniczych w polskich kopalniach. *Przełęcz Górniczy*, t. 75, nr 11, s. 23–33
24. Szlązak N., Obracaj D., Swolkień J. 2021 – Termoizolacja a warunki klimatyczne w wyrobiskach kopalń podziemnych. Pod red. Nikodema Szlązaka, Wydawnictwa AGH, ISBN: 978-83-66727-12-0
25. Ustawa z dnia 20 lipca 2017 r. Prawo wodne
26. Wang R.Z., Xu Z.Y., Hu B., Du S., Pan Q.W., Jiang L., Wang L.W. 2019 – Heat Pumps for Efficient Low Grade Heat Uses: From Concept to Application. *Thermal Science and Engineering*, 27, no.1, s. 1–15

Using Underground Water for Condensation Heat Rejection and Recovery in Underground Refrigeration Plants of Mines

Using various air cooling systems in underground mines results from harsh climatic conditions at workplaces. Underground refrigeration plants with compressor chillers are widely used in air cooling systems. The efficient operation of refrigeration units depends on the proper condensation heat rejection. Cooling capacity and localization of a refrigeration plant have the most significant influence on deciding of rejecting condensation heat to air or water. The limitation of the heat rejection capacity of return air streams in a typical mine and conditions facilitative to using underground water from an underground mine dewatering system is presented. Determinants and opportunities for heat recovery from water discharged to the surface are also discussed.

Keywords: *harsh climate conditions, mine cooling systems, mine refrigerant plant, condensation heat, waste heat recovery*