



## Strategia rozwoju klimatyzacji kopalń

### Strategy for mincooling development

*Dr hab. inż. Dariusz Obracaj\**

**Treść:** Zagrożenie klimatyczne w polskim górnictwie węgla kamiennego oraz rud miedzi wzrosło w ostatniej dekadzie. Istniejące instalacje klimatyzacyjne w tych kopalniach powoli wyczerpują swoje możliwości obniżania tego zagrożenia. Konieczne staje się poszukiwanie nowych rozwiązań zmierzających do poprawy efektywności schładzania powietrza na stanowiskach pracy. W artykule przedstawiono przegląd techniki klimatyzacyjnej w górnictwie światowym. Wskazano na wykorzystywanie lodu jako kolejnego etapu zwiększania mocy chłodniczych w kopalniach podziemnych. Omówiono możliwe sposoby wytwarzania i wykorzystania lodu w klimatyzacji kopalń. Przedstawiono uwarunkowania polskich kopalń w zakresie stosowania lodu. Zaproponowano koncepcje wykorzystania lodu zarówno dla kopalń eksploatujących istniejące instalacje klimatyzacyjne, jak i dla kopalń, które zamierzają wprowadzić klimatyzację.

**Abstract:** The climate hazard in the Polish hard coal and copper ore mining industry has increased in the last decade. The existing mine cooling installations in mines are slowly depleting their possibilities to reduce this hazard. It is necessary to look for new solutions aimed at improving the efficiency of cooling air at workplaces. An overview of mine cooling technology in global mining is presented in the article. The use of ice was indicated as the next stage of increasing cooling capacity in underground mines. Possible ways of making and using ice in mine cooling are discussed. The conditions of Polish mines in the field of ice use are presented. The concepts of using ice are proposed for both mines operating on the existing cooling installations and for mines that intend to introduce cooling systems.

#### Słowa kluczowe:

*zagrożenie klimatyczne, klimatyzacja kopalń, lód*

#### Keywords:

*climatic hazard, mine cooling, ice*

## 1. Wprowadzenie

Polskie górnictwo węgla kamiennego oraz rud miedzi boryka się narastającym zagrożeniem klimatycznym. O zagrożeniu klimatycznym w wyrobiskach podziemnych decydują parametry powietrza kopalnianego. Temperatura, wilgotność i prędkość przepływu powietrza wpływają na warunki mikroklimatu na stanowiskach pracy w wyrobiskach podziemnych. Poprzez zagrożenie klimatyczne rozumie się niekorzystny wpływ temperatury i wilgotności powietrza na organizm ludzki, który prowadzić może w konsekwencji do utraty zdrowia lub życia człowieka (Trutwin 1988, Maurya 2015).

W najbliższej przyszłości należy się liczyć z dalszym pogarszaniem się warunków klimatycznych w polskich kopalniach w wyniku zwiększenia koncentracji wydobywania oraz schodzenia z eksploatacją na głębsze poziomy.

Doświadczenia górnictwa światowego, przede wszystkim południowoafrykańskiego, wykazują, że rozwój techniki klimatyzacyjnej w kopalni podziemnej następuje etapowo wraz ze schodzeniem z eksploatacją na niższe poziomy. Doświadczenia te powinny być wykorzystywane w polskim górnictwie, dostosowując rozwiązania klimatyzacyjne do uwarunkowań polskich kopalń podziemnych.

## 2. Przegląd sposobów klimatyzacji kopalń w górnictwie światowym

Wraz ze wzrostem temperatury powietrza, warunki na stanowiskach pracy zbliżają się do dopuszczalnego poziomu obciążenia cieplnego wyrażanego dla człowieka stresem cieplnym (Maurya i in. 2015, Waclawik i in. 2015, Głuch, Szlązak, 2016, Roghanchi, Kocsis, 2018).

W górnictwie istnieją dopuszczalne warunki mikroklimatu na stanowisku pracy z obciążeniem cieplnym. Warunki te mogą być kształtowane między innymi poprzez zwiększenie intensywności przewietrzania wyrobisk podziemnych (wzrost prędkości przepływu powietrza). Jednak w przypadku wysokiej temperatury skał, wzrost strumienia przepływającego powietrza powoduje wzrost współczynnika przejmowania ciepła od ociosów wyrobiska (Waclawik i in. 1995, Szlązak, Obracaj 2017, Kocsis, Sunkpal 2017). Konieczne staje się zastosowanie klimatyzacji w miejscach pracy górników.

Najwcześniejsze znane zapisy dotyczące ochrony pracowników przed skutkami obciążenia cieplnego pochodzą z XIX wieku w Anglii, gdzie w kornwalijskich kopalniach cyny, już na głębokości 380 m występowała temperatura pierwotna skał 45,6°C. W kopalniach tych wykorzystywano zimną wodę do okresowego chłodzenia górników (Gebler 1980).

Pierwsze udokumentowane wprowadzenie instalacji chłodniczej w górnictwie podziemnym zrealizowane zostało w brazylijskiej kopalni złota Anglo American Morro Velho w roku 1919 r. W 1922 r. odnotowano pierwszy przypadek

\* AGH, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie WGiG

śmiertelnego udaru cieplnego w kopalniach południowoafrykańskich. W połowie lat 30. XX wieku zainstalowano w kopalniach pierwsze instalacje schładzania powietrza wlotowego do kopalni. W latach 60. XX wieku wprowadzono w górnictwie południowoafrykańskim podziemne chłodnice bezprzeponowe, a w latach 70. - podziemne chłodziarki, zasilające chłodnice bezprzeponowe. Również w Niemczech w latach 70. nastąpił rozwój techniki klimatyzacji kopalń. Wprowadzono układy klimatyzacyjne w obiegach zamkniętych z przepływami chłodnicami powietrza (Wacławik 1992, Łuska, Nawrat 2008, Szlązak i in. 2011).

Wzrost zapotrzebowania mocy chłodniczej oraz brak możliwości odprowadzania ciepła skraplania ze sprężarkowych urządzeń chłodniczych do powietrza kopalnianego spowodował rozwój powierzchniowych stacji chłodniczych. W konsekwencji doprowadziło to do rozwoju technologii z wykorzystaniem lodu.

Z uwagi na historyczny rozwój technologii klimatyzacji kopalń największe doświadczenie posiada górnictwo w Republice Południowej Afryki (du Plessis 2015, Hooman i in. 2015, Kamyar i in. 2016, Belle, Biffi 2018).

Duże doświadczenie w klimatyzacji miało również górnictwo w Niemczech i Wielkiej Brytanii. Aktualnie coraz większe doświadczenie zdobywa górnictwo północnoamerykańskie (USA i Kanada) oraz australijskie i chińskie (Brake 2002, Van Baalen, Howes 2009, Yang i in. 2011, Bluhm i in. 2014). W kopalniach kanadyjskich trwają prace badawcze nad zastosowaniem alternatywnych źródeł „chłodu”, w tym lodu naturalnego (Howes, Hortin 1997, Newman, Herbert 2009, Allen i in. 2012, Carvalho, Millar 2012, Li i in. 2016, Millar i in. 2016, Trapani i in. 2016).

Rozwiązania dotyczące klimatyzacji kopalń podziemnych w górnictwie światowym grupować można według różnych kryteriów. Klimatyzacja kopalń może być realizowana poprzez wytwarzanie energii chłodniczej zarówno na powierzchni, jak i na dole kopalni. Wykorzystanie tej energii może być realizowane na wiele sposobów. Aktualne standardy w tym zakresie narzuca górnictwo południowoafrykańskie, z uwagi na najdłuższe doświadczenia w tej branży i bieżące wprowadzanie nowych rozwiązań zarówno dla zwiększenia efektywności, jak i obniżenia kosztów działania klimatyzacji. Jako podstawę do wstępnego planowania strategii chłodniczej w kopalniach uwzględnia się tzw. „hierarchię chłodniczą” powiązaną z głębokością prowadzenia robót górniczych (temperaturą pierwotną skał). Zgodnie z tą hierarchią wyróżnia się podział klimatyzacji związany z miejscem odbioru ciepła w kopalni (du Plessis 2015, Hooman i in. 2015, Kamyar i in. 2016, Belle, Biffi 2018):

- schładzanie powietrza wlotowego do kopalni poniżej temperatury punktu rosy,
  - głębokie schładzanie powietrza wlotowego,
  - podziemne chłodzenie powietrza uzupełniające chłodzenie powietrza wlotowego,
  - dodatkowe schładzanie rejonowych prądów powietrza w kopalni podziemnej,
  - dodatkowe schładzanie powietrza w pobliżu stanowisk pracy.
- dodatkowy odbiór ciepła od procesów technologicznych - wykorzystywanie zimnej wody technologicznej.

Powyższe sposoby schładzania powietrza w klimatyzacji kopalń grupuje się jako jednostopniowe, dwustopniowe i trójstopniowe, jeżeli wykorzystuje się wszystkie powyższe sposoby. Technika klimatyzacji w kopalniach południowoafrykańskich rozwijała się zgodnie z powyższą kolejnością wraz ze wzrostem zapotrzebowania mocy chłodniczej.

Rozwiązania techniczne schładzania powietrza według powyższego podziału polegają na stosowaniu:

- powierzchniowych stacji chłodniczych schładzających wodę dla obniżenia temperatury i wilgotności powietrza wlotowego do kopalni;
- powierzchniowych stacji chłodniczych schładzających wodę, która transportowana jest do podziemnych układów klimatyzacyjnych (chłodnic przepływowych i bezprzeponowych) oraz do procesów technologicznych;
- połączonych stacji powierzchniowych i podziemnych schładzania wody;
- połączonych stacji powierzchniowych i podziemnych schładzania wody wraz z jej magazynowaniem i recyrkulacją – otwarte obiegi klimatyzacyjne;
- powierzchniowych stacji chłodniczych wytwarzających wodę schłodzoną z magazynowanego lodu na powierzchni;
- powierzchniowych stacji chłodniczych wytwarzających i transportujących lód na dół kopalni w celu schładzania wody.

Schładzanie powietrza wlotowego do kopalni, jako pierwszy stopień chłodzenia uruchamiany w wielu kopalniach, związane jest z wykorzystaniem chłodnic bezprzeponowych w postaci komór zraszania. Komory zraszania instalowane są przy szybach wdechowych. Chłodzone jest do 90% strumienia masy powietrza sprowadzanego szybem, a temperatura powietrza na wylocie z komór zraszania osiąga wartości od 6°C do 9°C. (Ramsden i in. 2007, Biffi, Stanton 2008, Mackay i in. 2010, Vosloo i in. 2012, Van Den Berg i in. 2013, Hooman i in. 2015). Powietrze zewnętrzne przetłaczane jest do komory zraszania za pomocą wentylatorów tłoczących, a następnie kierowane do szybu wdechowego. Podstawowym celem jest obniżenie przyrostu temperatury w wyniku autokompresji powietrza sprowadzanego pionowo w dół i dopływu ciepła od skał. W przypadku konieczności uzyskania niższej temperatury powietrza w komorach zraszania wykorzystuje się wodę zimną z zasobników z lodem, uzyskując temperaturę powietrza wlotowego do kopalni nawet poniżej 5°C (Gundersen i in. 2016).

Rozbudowa klimatyzacji w górnictwie południowoafrykańskim (Bluhm, Smit 2014) realizowana jest według przedstawionej powyżej „hierarchii chłodniczej”, w zależności od temperatury pierwotnej skał. Układy te są dedykowane przede wszystkim dla kopalń rud metali. Górnictwo węglowe, przede wszystkim eksploatujące złoża wielopokładowe, cechuje się inną technologią eksploatacji. W takich kopalniach bazuje się na doświadczeniach byłych kopalń niemieckich. Trudno jest przenieść bezpośrednio wypracowane rozwiązania klimatyzacyjne w kopalniach złota, platyny, miedzi, niklu do kopalń węglowych. Doświadczenia jednak wskazują jednoznacznie, że w przypadku wzrostu zapotrzebowania mocy chłodniczej powyżej 15 MW lub wzrostu temperatury pierwotnej skał powyżej 45°C uzasadnione jest wprowadzenie technologii chłodniczych opartych o lód (Ramsden i in. 2007, Van Den Berg i in. 2013)

Aktualnie, wśród ekspertów do spraw klimatyzacji w górnictwie środowisku australijskim prowadzona jest dyskusja nad optymalizacją rozwiązań klimatyzacji dla kopalń węgla. Podkreśla się, że rozwiązania z klimatyzacji kopalń złota, platyny, a nawet australijskiego górnictwa miedziowego nie do końca przynoszą spodziewane efekty w kopalniach węgla opartych o ścianowe systemy eksploatacji. Wynika to z odległości rejonów eksploatacyjnych od szybów wdechowych i szybkości ich przemieszczania się na obszarze górnictwa, co z kolei wymusza konieczność mobilności dołowych układów klimatyzacyjnych (Belle, Biffi 2010, 2018). Podkreśla się, że optymalnym rozwiązaniem byłoby wykonywanie otworów do sprowadzania chłodziwa w pobliże wlotów do rejonów. Chłodziwem może być schłodzona woda krążąca



w obiegu zamkniętym z chłodnicami powietrza w rejonie eksploatacyjnym. Wodę schłodzoną do temperatury poniżej 6°C, która wykorzystywana jest w chłodnicach do schładzania powietrza nazywa się wodą lodową. Takie rozwiązanie jest możliwe z uwagi na najnowsze technologie „wytwarzania” wody lodowej na powierzchni.

Rozwój branży chłodniczej w ostatnich dwóch dekadach spowodował, że w klimatyzacji kopalń wykorzystuje się coraz nowsze rozwiązania. W górnictwie południowoafrykańskim i australijskim zaczyna się rozpatrywać możliwości dzierżawy powierzchniowych stacji chłodniczych w celu uzyskania maksymalnych oszczędności (Belle, Biffi 2018). Rynek chłodnictwa zapewnia możliwość dostawy kontenerowych stacji chłodniczych o dużych mocach. Stacja taka może być szybko budowana bez wykonywania robót budowlanych. Zapewniają to konstrukcje kontenerowe urządzeń chłodniczych wraz z kompletnym oprzyrządowaniem. Takie układy są stosunkowo mobilne. W łatwy sposób można je demontować i przetransportowywać w inne miejsce (Belle, Biffi 2018).

Również w zakresie produkcji lodu dla potrzeb klimatyzacji kopalń nastąpił postęp w kierunku budowy kontenerowych wytwornic lodu. Przykładem jest zabudowa dwóch stacji kontenerowych, każda o wydajności 200 ton lodu na dobę w kopalni złota Phakisa należącej do spółki Harmony Gold Mining Company Limited w roku 2013. Po dostarczeniu wszystkich elementów, instalację uruchomiono w przeciągu 10 dni. Stacja kontenerowa oparta była o płytowe wytwornice lodu i sprężarki śrubowe z amoniakiem, jako czynnikiem chłodniczym (Evans 2015).

Mobilność powierzchniowych stacji chłodniczych powoduje pojawienie się dodatkowych usług chłodniczych. W niektórych spółkach górniczych zdecydowano się na sezonową dzierżawę powierzchniowych stacji chłodniczych. Dzierżawa powierzchniowych stacji chłodniczych w stosunku do całkowitej własności może być realizowana poprzez umowy dzierżawy z płatnością za osiągnięcie i utrzymanie mierzalnych parametrów ruchowych, które są istotne pod względem zamierzonego efektu klimatyzacyjnego jako całości. Istnieje jednak ryzyko, że źle skonstruowane umowy najmu spowodują wdrożenie jednostek o niskiej skuteczności (niskim współczynnikiem COP) lub takich, które nie zapewnią wymaganych warunków w określonym czasie. Koszty energii są zwykle po stronie najmującego, a zatem działanie nieefektywnych stacji chłodniczych negatywnie wpływa na koszty eksploatacyjne, niekoniecznie zapewniając wymagane warunki „produkcji lodu”. W niektórych przypadkach mogą wystąpić przerwy w pracy ze względu na awarię systemu chłodniczego i jeśli instalacje chłodnicze nie będą odpowiednio zabezpieczone, inwestorzy poniosą większe wydatki, o ile umowy nie zostaną jasno określone warunkującymi klauzulami. Z tego powodu rozwija się rynek usług „dostarczania lodu” do kopalni, na którym kopalnie zawierają umowy z usługodawcą bez ponoszenia nakładów inwestycyjnych w środki trwałe związane z instalacją chłodniczą.

B. Belle i M. Biffli przedstawiają porównanie wskaźnika wartości bieżącej netto NPV w okresie dziesięcioletnim dla budowy własnej, powierzchniowej stacji chłodniczej o koszcie 8,89 mln USD z kosztem dzierżawy tej stacji na poziomie 3,94 mln USD (Belle, Biffi 2018).

### 3. Lód jako czynnik chłodniczy w kopalniach podziemnych

Właściwości lodu dla celów medycznych i przechowywania żywności znane były już w czasach starożytnych (opisy Hipokratesa, Golenia, Protahora, Plinija). Technologie chło-

dzenia żywności oparte na śniegu lub lodzie pozyskiwanym z lodowców rozwinęły się za czasów Imperium Rzymskiego. W celu utrzymania lodu w dłuższym okresie czasu zaczęto dodawać sól do przechowywanych w lodzie substancji (Hansen i in. 2001). Technologia produkcji lodu nazwanego lodem sztucznym rozwinęła się znacznie później, chociaż już w starożytnym Egipcie znano sposób jego wytwarzania. Wytwarzanie sztucznego lodu w czasach nowożytnych datuje się od roku 1755, kiedy szkocki lekarz i chemik William Cullen rozpoczął jego produkcję.

W technice chłodniczej przyjmuje się początek rozwoju wykorzystywania lodu na rok 1793, kiedy w USA, Thomas Moore jako pierwszy uzyskał patent na zastosowanie lodu w procesie chłodniczym. W roku 1810 George Leslie zaprojektował i wykonał pierwszy generator lodu działający na zasadzie maszyny próżniowej (Bobkov 1977).

Wykorzystanie lodu w procesach klimatyzacji kopalń datuje się od drugiej połowy XIX wieku, kiedy w kopalniach wokół miasta Virginia City w Nevadzie zastosowano lód w postaci bloków sprowadzonych z gór do chłodzenia powietrza kopalnianego. W roku 1878 dzienne zużycie lodu wynosiło 95 funtów (ok. 43 kg) na jednego górnika (Lord, 1983, Greth i in. 2017). Miało to minimalny wpływ na poprawę warunków klimatycznych na stanowiskach pracy i było nieekonomiczne. Dopiero w drugiej połowie XX wieku lód powrócił do klimatyzacji kopalń afrykańskich.

Od początku lat 90. ubiegłego wieku nastąpiło masowe wykorzystanie lodu dla potrzeb klimatyzacji w kopalniach złota i platyny w związku z taryfowaniem energii elektrycznej w RPA. Osiągnięto obniżenie kosztów zużycia energii w procesie klimatyzacyjnym, głównie poprzez zmniejszenie ilości wody w dołowym obiegu chłodniczym poprzez produkcję lodu. Ciepło topnienia lodu pozwala na uzyskanie takiego samego efektu chłodzenia przy zaledwie 30% przepływie masowym w stosunku do wody (Kidd 1995, Sheer i in. 2001a).

Oprócz zalety związanej z niższymi kosztami pompowania mniejszej ilości wody w obiegu klimatyzacyjnym kopalni podziemnej, również znaczące jest zmniejszenie kosztów obniżenia temperatury wody dla celów klimatyzacyjnych. Temperaturę wody przy wykorzystaniu lodu produkowanego na powierzchni kopalni można uzyskać na poziomie 0,5°C przy niższych kosztach niż w urządzeniach sprężarkowych z czynnikiem chłodniczym R717.

Właściwości fizyczne lodu, takie jak: gęstość, ciepło właściwe, przewodnictwo cieplne, zmieniają się wraz z temperaturą poniżej 0°C. Gęstość lodu jest mniejsza niż wody, a względny przyrost objętości przy zamrażaniu wynosi około 8,5%. Woda podczas krystalizacji przyjmuje różną strukturę krystalizacyjną w zależności od ciśnienia i temperatur. Aktualnie istnieje 14 odmian strukturalnych lodu, z czego ostatnie dwie odkryte zostały przez Brytyjczyków w 2006 roku (Tribello i in. 2006).

Techniki produkcji lodu można podzielić na dwa główne sposoby, mianowicie dynamiczną i statyczną produkcję lodu (rys. 1-2). Sposób dynamiczny (rys. 1) związany jest z bezpośrednią produkcją lodu sztucznego, który transportowany jest do dalszych celów chłodniczych lub klimatyzacyjnych. Sposoby statyczne (rys. 2) polegają na produkcji lodu w zbiorniku wodnym. Rozróżnia się tutaj tradycyjne metody związane z produkcją lodu na wężownicy parownika urządzenia sprężarkowego lub wężownicy z glikolem o niskiej temperaturze (najczęściej od -4°C do -10°C). Pierwsza metoda związana jest z odpajaniem się lodu tworzącego się na wężownicy wymiennika. Druga metoda polega na spływie wody cieplej po wężownicy, co powoduje odspojenie lodu od rurek i powstanie zawiesiny lodowej w wodzie. W obu tych metodach można pobierać ze zbiorników albo wodę ochłodzoną

albo zawieszinę lodową. W celu uniknięcia efektu zbrzylania się lodu rozpuszczonego w wodzie stosuje mechaniczne lub pneumatyczne wymuszenie ruchu wody i lodu w zbiorniku. Do zbiornika podaje się również roztwory soli (Sheer i in. 2001b, Funnell i in. 2001, Kamyar i in. 2016).

Pomiędzy systemami dynamicznymi i statycznymi produkcji lodu zlokalizować można metody produkcji zawiesziny lodowej, która w sposób bezpośredni lub pośredni może być wykorzystywana do celów klimatyzacyjnych. W większości przypadków przy produkcji zawiesziny lodowej wykorzystuje się wodę z dodatkiem soli. Wytwornice zawiesziny lodowej (*ice-slurry*) można podzielić na:

- skrobakowe generatory lodu śnieżnego,
- generatory lodu próżniowego,
- aparaty fluidyzacyjne,
- wytwornice z bezpośrednim kontaktem czynnika z pulpą lodową.

Produkcja lodu śnieżnego za pomocą generatorów skrobakowych trafia do zbiornika (zasobnika lodu), z którego pobierana jest zawieszina lodowa.

W kopalniach południowoafrykańskich, ale również w górnictwie chińskim wykorzystuje się najczęściej zawieszinę lodową wytwarzaną za pomocą generatorów próżniowych (Ramsden, Lloyd 1992, Efrat, Rott 2010). Instalacja do wytwarzania lodu próżniowego składa się z trzech zasadniczych elementów:

- generatora w postaci zbiornika do wytwarzania próżni lodowej, w którym następuje krystalizacja wody pod wpływem podciśnienia;
- wtórnego układu chłodniczego do skraplania pary wodnej o niskim ciśnieniu;
- koncentratora, w którym zwiększa się udział masy lodowej, a zmniejsza się zasolenie produkowanej zawiesziny lodowej.

Generator próżniowy, jak i skraplacz pary wodnej wymagają odprowadzenia ciepła na zewnątrz układu. Z generatora (zbiornika) pobierana jest zawieszina lodowa, która transportowana jest do dalszych układów chłodniczych lub na dół kopalni. W kopalniach afrykańskich przekazuje się zawieszinę lodową na dół kopalni o wysokiej koncentracji lodu (powyżej 75%). Wysoka koncentracja masy lodu w zawieszinie pozwala zmniejszyć jej zasolenie. Jeżeli zmniejsza się koncentracja masy lodu w zawieszinie, konieczne jest zwiększenie zasolenia mieszaniny (Ramsden Lloyd 1992, Bellas, Tassou 2005).

Metoda próżniowego wytwarzania lodu jest możliwa do zastosowania przy produkcji lodu binarnego, zwanego umownie również zawiesziną lodową. W takiej mieszaninie sole zastępowane są glikolem, zmieniając właściwości fizyczne mieszaniny i umożliwiając jej przetłaczanie rurociągami za pomocą pomp. Optymalne stężenie lodu w zawieszinie powinno wynosić od 15 do 20 % wag., a rozmiar cząstek lodu powinien zawierać się w przedziale 0,1–0,5 mm. Temperatura zawiesziny lodowej powinna wynosić co najmniej  $-2^{\circ}\text{C}$ , co zapewnia dodatek glikolu w zawieszinie. Technologia ta rozwinęła się w różnych branżach przemysłowych, jednak nie została jeszcze wprowadzona do kopalń podziemnych z uwagi na brak uwarunkowań środowiskowych (Bellas, Tassou 2005, Kauffeld i in. 2010, Zhang Ma 2012, Szlązak, Obracaj 2012).

Wszystkie powyższe sposoby wytwarzania lodu znajdują zastosowanie w górnictwie światowym. Najstarszą i najtańszą metodą wytwarzania lodu dla potrzeb klimatyzacji kopalń jest sposób statyczny do schładzania i magazynowania wody w powierzchniowych zbiornikach wody. Ochłodzona woda sprowadzana jest ciągle lub cyklicznie do podziemnych zbiorników wody, z których pobierana jest do dalszych celów klimatyzacyjnych (rys. 1). Podziemny układ klimatyzacyjny jest zazwyczaj otwartym obiegiem z chłodziwem w postaci

wody lodowej, która może być wykorzystywana zarówno w bezprzeponowych, jak i przeponowych chłodnicach powietrza.

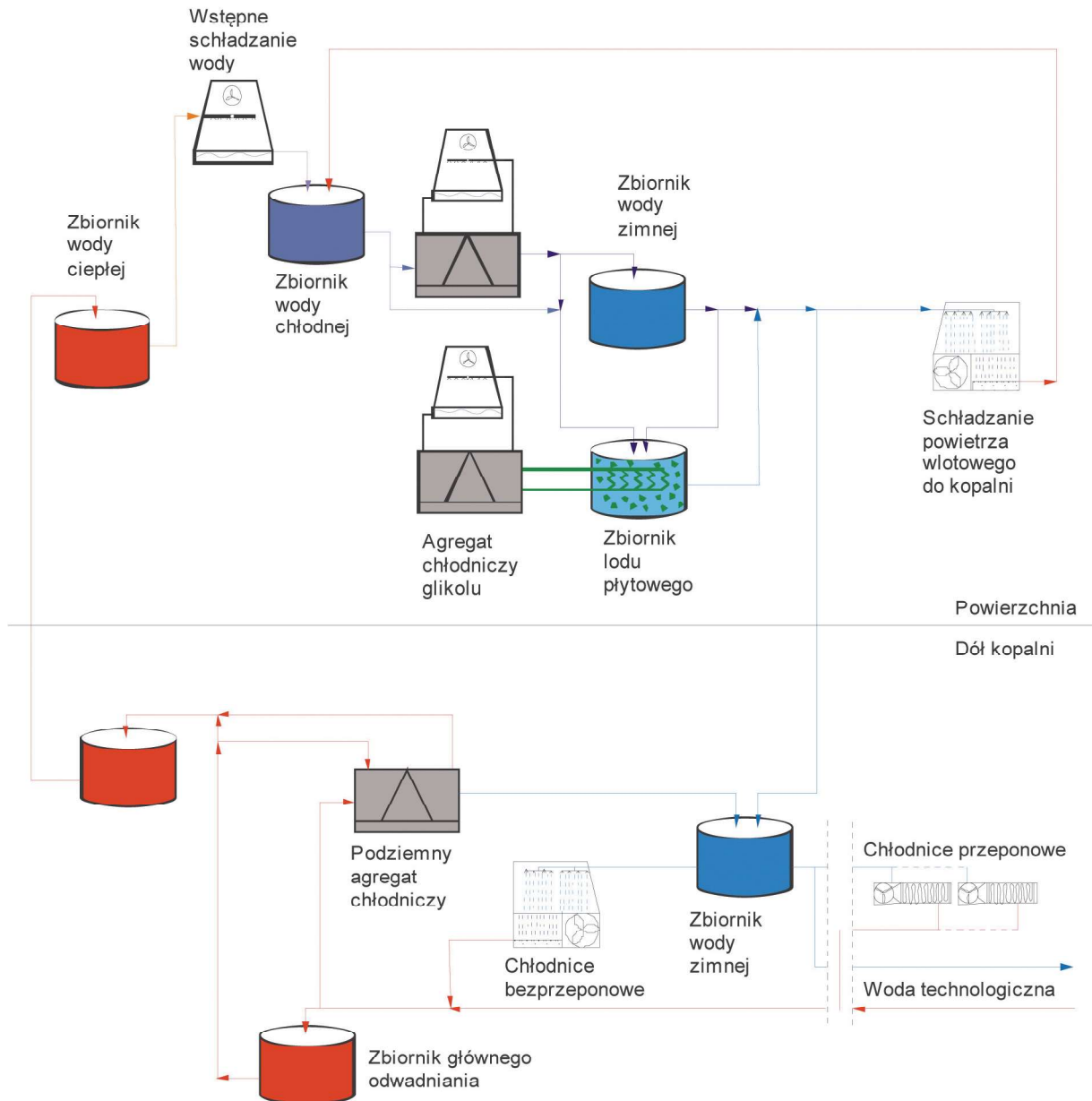
Pierwsza próba ruchowa w zakresie stosowania techniki klimatyzacyjnej przy pomocy zawiesziny lodowej została przeprowadzona w kopalni Niederberg. Jednak mechaniczne problemy z transportem mieszaniny wodno-lodowej spowodowały, że dalsze prace nad tym projektem nie były kontynuowane. Pierwszy system klimatyzacji z powierzchniową stacją wytwarzania lodu wybudowano w połowie lat osiemdziesiątych w kopalni Lorraine Shaft No.1 należącej wtedy do Rand Mines Group, a później do Harmony Gold Mining Company Limited. Stacja produkowała 1000 ton lodu na dobę, co zapewniało około 3,9 MW mocy chłodniczej (Eschenburg i in. 1986). Stacja składała się z 6 wytwornic lodu, z których każda zawierała 12 modułów z 80 węzownicami ze stali nierdzewnej. Woda spływała po zewnętrznej stronie węzownicy, w której parował amoniak. Powstały lód usuwany był z powierzchni rur w cyklu 12-minutowym poprzez zamianę obiegu na ciekły amoniak pod wysokim ciśnieniem. Lód następnie był transportowany pneumatycznie przez szybowy rurociąg  $\varnothing 200$  mm do zbiornika lodu na poziomie 1088 m (Ramsden Lloyd 1992).

Z kolei pierwsza instalacja lodu próżniowego została wykonana w kopalni Western Deep Levels South Shaft lub w skrócie No.1 Shaft, dzisiaj zwanej jako Mponeng, czyli „Spójrz na mnie” w języku Sotho. Na powierzchni zabudowana została instalacja do wytwarzania lodu, której wydajność wynosiła 350 ton na dobę. Lód o temperaturze zbliżonej do zera transportowany był rurociągiem  $\varnothing 200$  do podziemnego zbiornika znajdującego się na poziomie 1088 m pod ziemią. Po uruchomieniu przeprowadzono badania transportu zawiesziny lodowej o koncentracji lodu 10% i zasoleniu na poziomie 1900 ppm. Okazało się, że przy koncentracji lodu od 10% do 15% występowały największe problemy ze zbrzylaniem się lodu i zatorami przy pompowaniu takich zawieszin. Próby przeprowadzone przy większych koncentracjach lodu w zawieszinie były pomyślniejsze. Przetestowano transport zawiesziny o koncentracji 70% przy użyciu sprężonego powietrza i uzyskano najlepsze rezultaty. W ten sposób wypracowano transport grawitacyjno-pneumatyczny zawiesziny lodowej do kopalni o wysokiej koncentracji lodu (Ramsden Lloyd 1992).

Aktualnie kopalnia Mponeng osiąga głębokość 3960 m i jest najgłębszą kopalnią świata, a planowane jest otwarcie kolejnego poziomu 4420m. Temperatura pierwotna skał na poziomie 3800 m wynosi  $54,5^{\circ}\text{C}$ , a na poziomie 3960 m, odpowiednio  $58^{\circ}\text{C}$ . Siostrzane kopalnie Mponeng to kopalnie Savuka („My Zbudziliśmy” w języku Zulu) i TauTona („Wielki Lew” w języku Tswana), kiedyś zwane odpowiednio Western Deep No.2 Shaft i Western Deep No.3 Shaft. Kopalnia Savuka przekroczyła głębokość 3600 m. Kopalnia TauTona osiągnęła głębokość 3900 m z temperaturą pierwotną skał  $60^{\circ}\text{C}$ . Wspólnie kopalnie są znane jako West Wits. Wszystkie kopalnie stosują zaawansowane technologie klimatyzacyjne.

W kopalni Mponeng najbardziej rozwinięto układy klimatyzacyjne, uzyskując aktualnie 140 MW mocy zabudowanych urządzeń chłodniczych (Stinnette i in. 2016). Początkowo układ klimatyzacyjny oparty był o magazynowanie energii chłodniczej lodu w zbiornikach powierzchniowych (Efrat, Rott 2010). Wytwarzanie lodu w tych zbiornikach oparte jest o powstawanie lodu na wymienniku zasilanym schładzanym roztworem wodno-glikolowym (30% glikolu, 70% wody). Glikol schładzany jest do temperatury  $-5^{\circ}\text{C}$  w powierzchniowych chłodziarkach sprężarkowych z czynnikiem chłodniczym R134a. Następnie przepływa w zamkniętej pętli do płaszczowo-rurowego wymiennika ciepła, który zanurzony jest w zbiorniku z wodą. Do zbiornika z tworzącym się na wymienniku lodem dopływa wstępnie schłodzona woda





Rys. 1. Schemat ideowy klimatyzacji kopalni podziemnej z wykorzystaniem lodu produkowanego w sposób statyczny

Fig. 1. Scheme of the mine cooling utilising static ice production system

w zakresie temperatur od  $7^{\circ}\text{C}$  do  $13^{\circ}\text{C}$ . Woda ochładza się opływając oblodzony wymiennik i następnie jest przesyłana do kopalni o średniej temperaturze  $3,5^{\circ}\text{C}$ . Wraz z eksploatacją tego systemu pojawiły się problemy związane przede wszystkim z brakiem utrzymania ustalonej temperatury wody doprowadzanej do zasobników lodu. Powodowało to nadmierne obładanie zbiorników, a z czasem również trudności z uzyskaniem ustalonej temperatury wody wypływającej ze zbiornika.

Koszty związane z eksploatacją układów klimatyzacyjnych opartych o schładzanie wody lodowej z lodu w sposób statyczny są wysokie, nawet uwzględniając wykorzystanie turbin Peltona w pionowych rurociągach wody sprowadzanej oraz turbin Francisza na poziomach wydobywczych do produkcji energii. Związane jest to przede wszystkim z nadal dużą masą transportowanej wody na dół kopalni. Korzyści z eksploatacji takich układów bilansują się dla kopalń złota

do głębokości około 3200 m, tj. do temperatury pierwotnej górotworu około  $50^{\circ}\text{C}$  przy założeniu wykorzystywania zmiennych taryf energii elektrycznej do produkcji lodu porą nocną. Dlatego coraz częściej sprowadza się lód na dół kopalni i wykorzystuje się recyrkulację podziemnych obiegów wodnych (Belle, Biffi 2018). Na początku XXI wieku w kopalni Mongpeng zdecydowano się wprowadzić lód transportowany na dół kopalni w sposób:

- grawitacyjny lub grawitacyjno-pneumatyczny, jako lód stały o zawartości wody w mieszaninie do ok. 5%;
- grawitacyjno-pneumatyczny, jako zawiesina lodowa o zawartości wody do 30% w mieszaninie;
- hydrauliczny, jako zawiesina lodowa o zawartości wody powyżej 85% w mieszaninie.

Trzeci sposób transportu zawiesiny lodowej o niskiej koncentracji masowej lodu dotyczy układów hydraulicznych z wykorzystaniem zestawów pompowych mieszaniny. Taki sys-





kopalni, 40 MW mocy dla podziemnych agregatów chłodniczych (8 x 5 MW) i 23 MW dla produkcji lodu. Aktualnie zakończono pierwszą fazę budowy instalacji o mocy 78 kW i trwa jej rozbudowa. Strumień schładzanej wody na powierzchni wynosi 380 dm<sup>3</sup>/s.

Zabudowano chłodnice bezprzeponowe o sumarycznej mocy chłodniczej 47 MW i chłodnice przeponowe o sumarycznej mocy chłodniczej 25 MW. Część z tych chłodnic pracuje w zamkniętych obiegach chłodniczych związanych z podziemnymi agregatami chłodniczymi (70%), a część w obiegach otwartych (30%). Moc chłodnicza w kopalni przeznaczana jest również do chłodzenia urządzeń i procesów technologicznych w rejonach eksploatacyjnych.

Lód w ilości 68 kg/s wytwarzany jest systemem bezpośrednim przy wykorzystaniu płytowych wytwornic lodu, a następnie sprowadzany jest grawitacyjnie dwoma rurociągami PVC o średnicy 400 mm, zabudowanymi w łamanym szybie, tj. do poziomu 1940 m i dalej do poziomu 3670 m. Lód wychodzący wraz z wodą z wytwornic lodu przepływa przez specjalne leje, gdzie oddzielane są części stałe od wody. Zdecydowano się na transport lodu metodą grawitacyjną pomimo łatwości produkcji zawiesiny lodowej.

Reasumując, należy stwierdzić, że łatwiej sprowadzać lód na dół kopalni w otwartych niż w zamkniętych obiegach instalacji klimatyzacyjnych. W otwartych układach lód jest sprowadzany grawitacyjnie lub pneumatycznie bez konieczności stosowania przepompowania cieczy jaką jest zawiesina lodowa w obiegach zamkniętych. Przy transporcie hydraulicznym zawiesiny lodowej pojawiają się problemy związane z koagulacją cząstek lodu, które mogą prowadzić do zatorów, przede wszystkim na armaturze rurowej. Występuje niebezpieczeństwo oblodzenia wokół kołnierzy stalowych (uszczelki) lub kompensatorów w trakcie zmian prędkości przepływu zawiesiny. Szczególnie narażona jest instalacja poniżej zębów szybu w okresach zimowych. W przypadku awarii i zatrzymania przepływu następuje efekt wyporu lodu w pionowym rurociągu, co powoduje szybkie zbrzylenie się cząstek, przede wszystkim jeżeli zawiesina jest pozbawiona środka obniżającego krzepliwość wody. Dodatkowym, nierozwiązanym dotychczas problemem w pionowych instalacjach rurowych w obiegach zamkniętych jest różnica gęstości pomiędzy zawiesiną lodową a wodą ciepłą w pionowym rurociągu powrotnym. Jeśli zawiesina jest przepompowywana rurociągami pionowymi to dla redukcji ciśnienia hydrostatycznego stosuje się między innymi trójkomorowy rurowy podajnik cieczy. Zawiesina lodowa o niskiej koncentracji lodu może komplikować pracę podajnika cieczy stanowiącego ogniwo łączące rurociągi („efekt U-rurki”) i tym samym pracę pomp obiegowych. Problemy te należy rozwiązać przy opracowywaniu kolejnych projektów.

W niektórych krajach rozpatruje się zagospodarowanie dwutlenku węgla z procesów technologicznych w celach chłodniczych. Suchy lód produkowany jest w procesie rozprężania, obniżania ciśnienia ciekłego dwutlenku węgla. W efekcie tego procesu uzyskuje się stałą strukturę podobną do śniegu, którą można formować na prasach w bloki i granulki. Suchy lód ulega sublimacji z pominięciem fazy ciekłej, temperatura sublimacji pod ciśnieniem 100 kPa wynosi -78,9°C, a ciepło sublimacji wynosi ok. 574 kJ/kg. Gęstość suchego lodu wynosi 1560 kg/m<sup>3</sup>. Ciepło sublimacji i gęstość suchego lodu są większe niż ciepło topnienia i gęstość lodu wodnego co sprawia, że ma on przewagę nad lodem wodnym. Suchy lód można rozpatrywać w celach chłodniczych tylko na powierzchni kopalń podziemnych. W przyszłości technologia chłodnicza z suchym lodem może zostać rozwinięta i wykorzystywana na powierzchni kopalń podziemnych do celów chłodniczych.

#### 4. Uwarunkowania wykorzystywania lodu w polskich kopalniach podziemnych

W technice klimatyzacji polskich kopalń podziemnych występuje obecnie tendencja z wdrażaniem klimatyzacji centralnej z powierzchniowymi agregatami chłodniczymi o dużych mocach chłodniczych. Takie powierzchniowe stacje klimatyzacyjne schładzają wodę, która krąży w obiegu zamkniętym pomiędzy stacją a przeponowymi chłodnicami powietrza w rejonach eksploatacyjnych i przygotowawczych. Całkowita moc chłodnicza powierzchniowych stacji klimatyzacyjnych nie przekracza 15 MW z uwagi na ekonomiczne uwarunkowania transportu określonej masy wody w obiegu zamkniętym. Sprawność działania klimatyzacji centralnej zależna jest między innymi od odległości chłodnic powietrza od szybów, którymi sprowadzana jest woda schłodzona. Jeżeli odległość ta przekracza 5000 m to efektywność klimatyzacji spada gwałtownie w wyniku przyrostu temperatury przepływającej wody (Szlązak, Obracaj 2017).

Stosowanie dołowych stacji klimatyzacyjnych z podziemnymi agregatami chłodniczymi o dużych mocach chłodniczych warunkują również przepisy górnicze.

Lód w klimatyzacji polskich kopalń nie był do tej pory stosowany, chociaż opracowano projekt jego zastosowania przy wyborze koncepcji pierwszej klimatyzacji centralnej w Polsce dla KWK „Pniówek”.

Omówione przykłady techniki wykorzystywania lodu w kopalniach innych krajów wskazują na dość istotne kwestie. Stosowanie lodu jako chłodziwa posiada przewagę nad wodą wynikającą z dużej wartości ciepła topnienia lodu, tj. 333,7 kJ/kg, w stosunku do ciepła właściwego wody 4,19 kJ/(kgK). Aby przejąć tyle samo ciepła co lód, woda musiałaby być podgrzana od 0,5°C do 80°C. W stosowanych obiegach klimatyzacyjnych kopalń, woda odbiera ciepło podnosząc swoją temperaturę w zakresie 12-20°C. Wobec tego, do przeniesienia takiej samej ilości ciepła potrzebna jest 5-8 razy większa masa wody niż lodu. Rozpuszczenie 1000 ton lodu na dobę daje moc chłodniczą 3875 kW.

Polskie górnictwo wykorzystuje obiegi wodne dla celów klimatyzacji wykonane z rur stalowych o połączeniach kołnierzowych. Doświadczenia górnictwa południowoafrykańskiego pokazują, że podczas transportu takimi rurociągami mogą pojawiać się zatory lodowe związane z oblodzeniem połączeń rur lub armatury rurowej (zawory, zasuwy, trójniki). Istotne znaczenie ma również rozległość sieci rurociągów na poziomach i „straty chłodu” w takich instalacjach. Sumaryczna długość rurociągów obiegu wody lodowej wynosi od kilkunastu do kilkudziesięciu kilometrów w rozbudowanych instalacjach. W tych rurociągach „straty chłodu” dochodzą do 40% (Szlązak, Obracaj 2017), co powodować będzie szybkie rozpuszczanie się drobnych cząstek lodu w wodzie i wpływać na obniżenie efektywności energetycznej układu klimatyzacyjnego.

Wykorzystanie lodu do schładzania wody na powierzchni kopalni nie jest ekonomiczne w obiegach zamkniętych, gdyż produkcja lodu jest droższa niż schładzanie wody przy użyciu sprężarkowych lub absorpcyjnych urządzeń chłodniczych. Lepszym rozwiązaniem jest transport lodu na dół kopalni, gdzie udział jego masy jest znacznie mniejszy w stosunku do sprowadzanej wody dla tej samej mocy chłodniczej. Dodatkową jego zaletą jest zdolność akumulacji ciepła w dłuższym czasie. Transport lodu jest trudny z uwagi na jego właściwości. Doświadczenia praktyczne wykazują, że pionowy transport hydrauliczny lodu nawet o bardzo małej frakcji cząstek lodu nie został do tej pory rozwiązany. Najkorzystniejszym rozwiązaniem jest grawitacyjny lub grawitacyjno-pneumatyczny transport lodu w postaci stałej lub mieszanej z wodą o koncentracji powyżej 70%.





z topniejącym lodem. Temperatura wody na poziomie kilku stopni Celsjusza może być wykorzystana do zraszania przesyków przy odstawie urobku przenośnikami taśmowymi, czy zasilania układów zraszających na kombajnach. Temperatura takiej wody „z odzysku” jest zwykle niższa od temperatury punktu rosy powietrza w przodkach eksploatacyjnych czy chodnikowych. Taka woda nadaje się również do stosowania w bezprzeponowych chłodnicach powietrza. Stosowanie bezprzeponowych chłodnic powietrza uwarunkowane jest jednak gospodarką wody ściekowej. Woda ściekowa, o temperaturze kilkunastu stopni Celsjusza, odprowadzana z chłodnic powietrza nie powinna mieć kontaktu z powietrzem kopalnianym i może być z powodzeniem stosowana do chłodzenia maszyn i urządzeń w rejonach eksploatacyjnych i przygotowawczych.

#### Wariant 2. Pośrednie chłodzenie wody w zasobniku lodu

Zbiornik (zasobnik) lodu uzupełniany jest lodem sztucznym sprowadzanym grawitacyjnie lub okresowo w sposób grawitacyjno-pneumatyczny poprzez uzbrojony otwór wiertniczy, podobnie jak w wariantcie 1.

Ogólna zasada układu chłodniczego polega na kierowaniu wody powracającej z przeponowych chłodnic powietrza do wymiennika zabudowanego w zbiorniku lodu. Woda po ochłodzeniu w wymienniku kierowana będzie z powrotem do chłodnic powietrza. Woda może zostać ochłodzona w wymienniku ciepła do niskiej temperatury (ok. 3°C), co zapewni efektywne schładzanie powietrza za pomocą wodnych chłodnic powietrza w rejonach prowadzonych robót eksploatacyjnych i przygotowawczych. Woda z topniejącego lodu pobierana będzie do zasilania innych układów chłodniczych lub wykorzystywana będzie jako woda technologiczna w rejonie. Natężenie masowe wody odprowadzanej będzie takie samo jak natężenie masowe lodu dostarczanego do zbior-

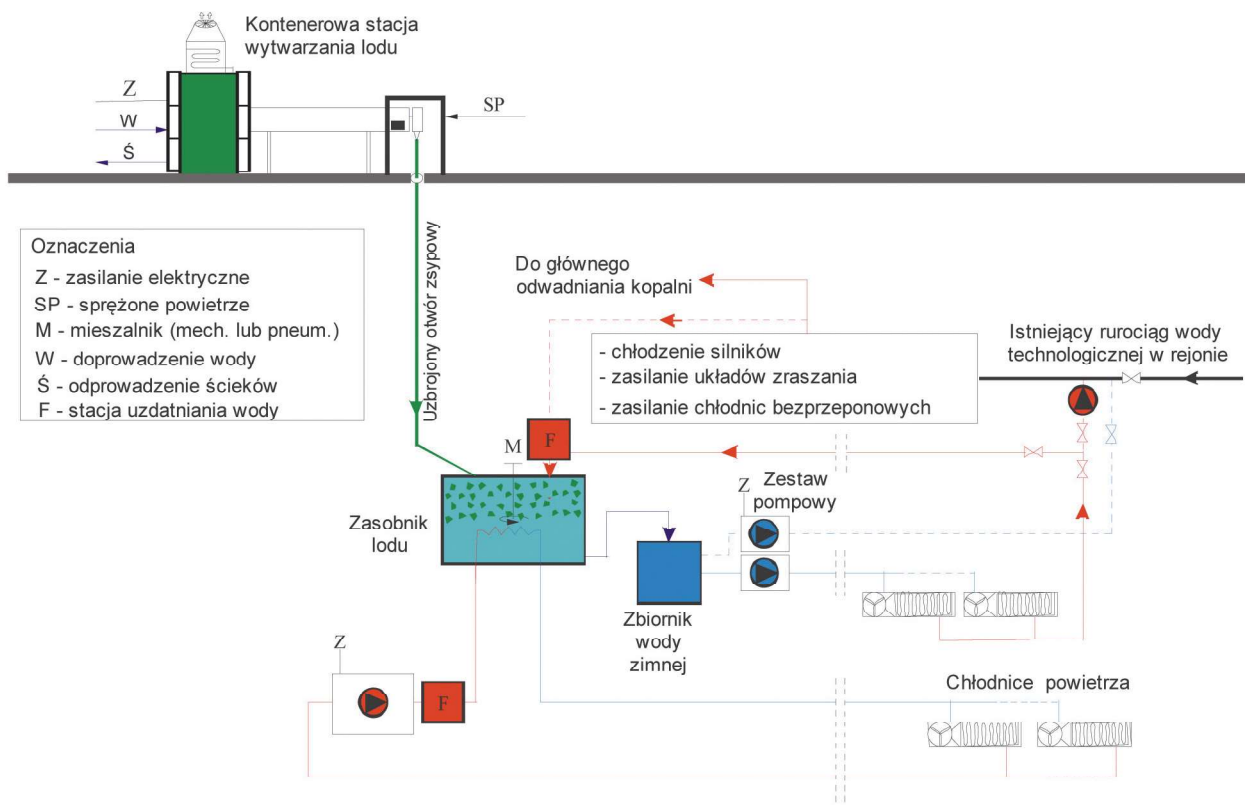
nika. Lód w zbiorniku będzie wymagał mieszania, podobnie jak w wariantcie 1. W przypadku braku robót w rejonie lód nie musi być transportowany z powierzchni, a woda nie musi być pobierana ze zasobnika lodu. Woda chłodnicza krążyć może przez pewien okres w obiegu zamkniętym dzięki określonemu zasobowi energii chłodniczej w zasobniku lodu. Schemat ideowy takiego rozwiązania przedstawiono na rys. 4.

W obu wariantach możliwe jest przeprowadzenie bilansu masy i energii dla zaprojektowania proponowanych rozwiązań. Możliwe są również inne pośrednie rozwiązania wymiany ciepła w zbiornikach (zasobnikach) lodu, w tym współpraca z istniejącymi układami klimatyzacji centralnej lub grupowej. Z punktu widzenia technicznego możliwe jest przetłaczanie zawiesziny lodowej na duże odległości, ale nachylenie rurociągów zbudowanych z PVC nie powinno przekraczać kilku procent.

Powyższe rozwiązania opracowane zostały na podstawie doświadczeń kopalń południowoafrykańskich. Zaprojektowanie i wykonanie takich instalacji jest możliwe w warunkach polskich kopalń węglowych oraz kopalń rud miedzi.

## 6. Podsumowanie

Wzrost zapotrzebowania na moce chłodnicze w polskich kopalniach węgla i rud miedzi związany jest przede wszystkim z głębokością prowadzonej eksploatacji. Warunki klimatyczne ulegają pogorszeniu, co skutkuje wzrostem zagrożenia klimatycznego. Stosowane rozwiązania klimatyzacyjne w polskich kopalniach posiadają ograniczenia co do zakresu przenoszonych mocy chłodniczych. Efektywność schładzania



Rys. 4. Schemat ideowy proponowanej klimatyzacji z pośrednim i bezpośrednim schładzaniem wody w podziemnym zasobniku lodu

Fig. 4. Scheme of the proposed cooling system with both direct and in-direct cooling of water in the underground ice storage

powietrza spada wraz ze wzrostem odległości robót górniczych od szybów wdechowych.

Doświadczenia górnictwa światowego wykazują, że wraz ze wzrostem zagrożenia klimatycznego w kopalniach, rozwiązania klimatyzacyjne ewoluują w kierunku wykorzystywania lodu.

Lód posiada duży potencjał chłodniczy z uwagi na wysoką wartość ciepła topnienia w stosunku do innych substancji. W górnictwie światowym wykorzystuje się go do ochładzania wody zarówno na powierzchni, jak i na dole kopalni. Lód sprowadzany może być do kopalni grawitacyjnie lub grawitacyjno-pneumatycznie w formie stałej (powyżej 95% masy lodu w mieszaninie lodowo-wodnej) lub w formie zawiesiny (powyżej 75% masy lodu w mieszaninie lodowo-wodnej). Lód transportowany powinien być rurociągami wykonanymi z rur PVC. Negatywne próby hydraulicznego sprowadzania lodu o niskiej koncentracji w rurociągach pionowych spowodowały, że ten system transportu nie został technicznie rozwinięty.

W polskim górnictwie możliwe jest wykorzystanie lodu zarówno dla kopalń nieposiadających jeszcze instalacji klimatyzacyjnych, jak również z istniejącymi instalacjami klimatyzacji grupowej lub centralnej. Można rozpatrywać znane sposoby dostarczania lodu z powierzchni do podziemnych zbiorników zlokalizowanych jak najbliżej rejonów eksploatacyjnych. Umożliwia to technologia zabudowy kontenerowych wytwornic lodu bez konieczności prowadzenia robót budowlanych. Technika wiertnicza umożliwia z kolei wykonywanie głębokich otworów do sprowadzania lodu do zbiorników podziemnych.

Główną ideą klimatyzacji opartej o lód jest wykorzystanie wody z topniejącego lodu do odbioru ciepła na stanowiskach pracy z uwagi na dotychczasowy brak rozwiązań wymienników zasilanych zawiesiną lodową. W podziemnych zbiornikach dochodzi do mieszania się lodu z wodą ciepłą „z odzysku” powracającą z chłodnic powietrza. Może to być woda z istniejących układów klimatyzacyjnych lub woda z niezależnego obiegu klimatyzacyjnego. Woda z topniejącego lodu powinna być zagospodarowana w miejsce dotychczasowego wykorzystywania wody technologicznej, np. do chłodzenia silników maszyn i urządzeń lub układów zraszania w profilaktyce pyłowej. Takie rozwiązanie nie wpłynie na wzrost dopływu wody w systemie odwadniania kopalni, a przyniesie dodatkowy efekt klimatyzacyjny w rejonie eksploatacyjnym.

## Literatura

- ALLEN C, MORGAN J, RANTANEN E., 2012 – Modular thermal transfer unit (MTTU) – portable surface ice stope. In: Proceedings of the 14th U.S./North American Mine Ventilation Symposium, Salt Lake City.
- BELLAS I., TASSOU S.A., 2005 – Present and future applications of ice slurries, *International Journal of Refrigeration*, 28, 115–121.
- BELLE B., BIFFI M., 2010 – Cooling pathways for deep Australian longwall coal mines of the future, in Proceedings Mine Ventilation Conference 2010, (The Australian Institute of Mining and Metallurgy: Adelaide, pp 94-104).
- BELLE B., BIFFI M., 2018 – Cooling pathways for deep Australian longwall coal mines of the future. *International Journal of Mining Science and Technology*. In\_Press (8 March 2018).
- BIFFI M., STANTON D.J., 2008 – Cooling power for a new age Third International Platinum Conference ‘Platinum in Transformation’, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2008.
- BLUHM S. SMIT., H. 2014 – Planning ventilation and refrigeration requirements, in *Ventilation and Occupational Environment Engineering in Mines* (ed: J J L du Plessis), third edition, chapter 38, pp 773–804 (Mine Ventilation Society of South Africa: Johannesburg)
- BLUHM S., MOREBY R., VON GLEHN F., PASCOE C., 2014 – Life-of-mine ventilation and refrigeration planning for Resolution Copper Mine. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 114: 497-503.
- BOBKOV W.A., 1977 – Proizvodstvo i primienjenje loda. Wyd. Piszewaja Promyslennost.
- BRAKE D.J., 2002 – Design of the world’s largest bulk air cooler for the Enterprise mine in northern Australia. In: de Souza E, editor. Proceedings of the 9th U.S. Mine Vent. Symp. Lisse: A.A. Balkema, p. 381–99.
- CARVALHO M., MILLAR D.L., 2012 – Concept development of optimal mine site energy supply. *Energies*, 5(11), 4726–45.
- du PLESSIS J.J.L., 2015 – Strategy and Tactics Implemented to Achieve Energy-efficient Ventilation and Cooling of Mines. In: *The Australian Mine Ventilation Conference*, Sydney.
- EFRAT T., ROTT S., 2010 – 27 MW Industrial cooling applications based on the ide’s energy efficiency vacuum icemaker. *IIR Proceedings Series “Refrigeration Science and Technology”*, No. 5, p. 177-183.
- ESCHENBURG H.M.W., MIDDLETON J.V.G., HEMP R., 1986 – 1000 ton per day ice plant for underground cooling at Harmony gold mine. *International Journal of Refrigeration*, Vol. 9, Iss. 6, pp. 357-361.
- EVANS G., 2015 – Ice cooling takes the heat off at Harmony’s Phakisa gold mine. -16 February 2015. Analysis. [www.mining-technology.com](http://www.mining-technology.com)
- FUNNEL, R.C., BLUHM S.J., SHEER, T.J., 2001 – Optimisation of cooling resources in deep stopes. Proceedings of the 7th International Mine Ventilation Congress, EMAG. Krakow.
- GEBLER W.F., 1980 – A reviews of mine cooling practices through the ages. *Journal of the Mine Ventilation Society of South Africa*, 33, 11, 209-22.
- GLUCH B., SZLAZAK N., 2016 – Metody oceny warunków mikroklimatu w wyrobiskach podziemnych, *Archiwum Górnictwa*, Monografia nr 16, Kraków.
- GRETH A., ROGHANCHI P., KOCSIS K., 2017 – A review of Cooling System Practices and their applicability to deep and hot underground US mines. In: Proceedings of the 16th North American Mine Ventilation Symposium, June 17-22, 2017, Golden, Colorado USA, Volume: 11.
- GUNDERSEN R.E., DE VILLIERS L.J., DU PLESSIS J.J.L., 2016 – The design of cooling systems for mining at a depth of 4 000 m. In: Proceedings of the 16th U.S./North American Mine Ventilation Symposium, Colorado.
- HANSEN T.M., KAUFFELD M., SARI O., EGOLF P.W., PASCHE F., 2001 – Research, Development and Applications of Ice Slurry in Europe, From Ancient Rome to Modern Technology, Proceedings of the Fourth Workshop on Ice Slurries of the International Institute of Refrigeration, 1-12, Osaka, Japan.
- HOOMAN M., WEBBER-YOUNGMAN R., DU PLESSIS J., MARX W., 2015 – A decision analysis guideline for underground bulk air heat exchanger design specifications, *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 115: 125-129.
- HOWES M., HORTIN K., 1997 – Surface cooling at Kidd Creek mine. In: Proceedings of the 6th International Mine Ventilation Congress, Brisbane.
- KAMYARA., AMINOSADATI S.M., LEONARDI C., SASMITO A., 2016 – Current development and challenges of underground mine ventilation and cooling methods. In: 2016 Coal Operators’ Conference, Wollongong.
- KAUFFELD M., WANG M.J., GOLDSTEIN V., KASZA K.E., 2010 – Ice slurry applications. *International Journal of Refrigeration*, 33, 1491-1505.
- KIDD, J., 1995 – Slurry ice production in gold mining, *South African Mechanical Engineer*, 45: 11-14.
- KOCSIS, K.C., SUNKPAL, M., 2017 – Identifying and controlling heat-induced health and safety problems in underground mines. *Mining Engineering*, 69 (9), 53-60.
- LORD E., 1983 – *Comstock mining and Miners*, Government Printing Office, Washington.
- MACKAY L., BLUHM S., VAN RENSBURG J., 2010 – Refrigeration and cooling concepts for ultra-deep platinum mining. In: Proceedings The 4th International Platinum Conference, Platinum in Transition ‘Boom or Bust’ 2010, pp 285-292.



- MAURYA T., KAILASH K., VARDHAN H., ARUNA M., RAJ G.M., 2015 – Effect of Heat on Underground Mine Workers. *Procedia Earth and Planetary Science*, 11, 491-498.
- MILLAR D., TRAPANI K., ROMERO A., 2016 – Deep mine cooling, a case for Northern Ontario: Part I *International Journal of Mining Science and Technology*, Volume 26, Issue 4, 721-727.
- LUSKA P., NAWRAT S. 2008 – Klimatyzacja kopalń podziemnych: systemy chłodnicze. AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne. Kraków.
- NEWMAN L., HERBERT Y., 2009 – The use of deep water cooling systems: two Canadian examples. *Renew Energy* 2009;34(3):727-30.
- RAMSDEN R., BRANCH A., WILSON R., 2007 – Factors influencing the choice of cooling and refrigeration systems for mines, *Journal of the Mine Ventilation Society of South Africa*, 60: 92-98.
- RAMSDEN R., LLOYD F., 1992 – Investigation into the Use of Slurry Ice at Western Deep Levels. In: 5th International Mine Ventilation Congress. Johannesburg.
- ROGHANCI P., KOCSIS K.C., 2018 – Challenges in Selecting an Appropriate Heat Stress Index to Protect Workers in Hot and Humid Underground Mines. *Safety and Health at Work*, Vol. 9, Iss. 1, pp 10-16.
- SHEER T.J., RAMSDEN R., BUTTERWORTH M.D., 2001a – Ice as coolant for deep mines. *Proceedings of the 7th International Mine Ventilation Congress*: 354-361. Krakow, June, Poland, EMAG.
- SHEER T.J., RAMSDEN R., BUTTERWORTH M.D., 2001b – The design of pipeline systems for transporting ice into deep mines. *Handbook of Powder Technology*, vol. 10, 2001, 425-433.
- STINETTE J.D., JONG E.C., LUXBACHER K.D., SCHAFFRIK S.J., 2017 – Building a Global paradigm for Ventilation best-Practices. *Proceedings of the 16th North American Mine Ventilation Symposium*, June 17-22, 2017, Golden, Colorado USA, Volume: 16.
- SZŁĄZAK N., OBRACAJ D., 2012 – Klimatyzacja kopalni podziemnej z wykorzystaniem lodu zawieszinowego. *Kwartalnik AGH „Górnictwo i Geologia”*, t.7, z. 4.
- SZŁĄZAK N., OBRACAJ D., BOROWSKI M., 2011 – Wykorzystanie lodu w klimatyzacji kopalń. *Prace Naukowe GIG „Górnictwo i Środowisko”* nr 1/1, s. 367-378.
- 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.
- TRAPANI K., ROMERO A., MILLAR D., 2016 – Deep mine cooling, a case for Northern Ontario: Part II. *International Journal of Mining Science and Technology*, 26, 1033-1042.
- TRIBELLO G.A., SLATER B., SALZMANN C.G. 2006 – A blind structure prediction of ice XIV, *J. Am. Chem. Soc.* 128, 12594-12595.
- TRUTWIN W. 1998 – W trudnych warunkach ciepłych. „*Ratownictwo Górnicze*” nr 4 (12), s. 19-20.
- VAN BAALEN G., HOWES M.J., 2009 – Evaluation of future refrigeration for the Enterprise Mine, Mount Isa, 9th IMVC, Delhi.
- VAN DEN BERG L., FUNNELL R., BLUHM S., 2013 – Mine cooling for hot underground mines, *The AusIMM Bulletin*, 5: 72-74.
- VOSLOO J., LIEBENBERG L., VELLEMAN D., 2012 – Case study: Energy savings for a deep-mine water reticulation system, *Applied Energy*, 92: 328-335.
- WACŁAWIK J., 1992 – Centralne systemy klimatyzacji w górnictwie węglowym Republiki Federalnej Niemiec. *Biurow Studiów i Projektów Górniczych – Informator Komisji ds. Przewietrzania Kopalń* nr 12 i 13. Katowice.
- WACŁAWIK J., CYGANKIEWICZ J., KNECHTEL J., 1995 – Warunki klimatyczne w kopalniach głębokich. *Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej*. Wyd. PAN CPPGSMiE, Kraków.
- WACŁAWIK J., KNECHTEL J., ŚWIERCZEK L., 2015 – Funkcje badawczo-interpretacyjne bilansu cieplnego organizmu pracownika w ocenie obciążenia termicznego. „*Przeгляд Górniczy*”, nr 1, s. 100-108.
- YANG X.J., HAN Q.Y., PANG J.W., SHI X.W., HOU D.J., 2011 – Progress of heat-hazard treatment in deep mines. *Mining Science Technology*, 21 (2), 295-299.
- ZHANG P., MA Z.W., 2012 – An overview of fundamental studies and applications of phase change material slurries to secondary loop refrigeration and air conditioning systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 5021-5058.

Artykuł wpłynął do redakcji – listopad 2018  
Artykuł akceptowano do druku – kwiecień 2019



**LUBELSKI WĘGIEL**  
**„BOGDANKA”**  
SPÓŁKA AKCYJNA

**KOPALNIA**  
INTELIŻENTNYCH  
ROZWIĄZAŃ

jestemy notowani w indeksach:  
mWIG40, WIG-GÓRNICZTWO, InvestorMS oraz Respect Index

[www.lw.com.pl](http://www.lw.com.pl)