

Technika zamrażania gruntów i skał luźnych

Dr hab. inż. Andrzej Więckowski, prof. AGH, mgr inż. Dariusz Hajto,
mgr inż. Paweł Proficz, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

1. Wprowadzenie

Nawodnione grunty i skały luźne, szczelinowate, z przewarstwieniami wodonośnymi, zwłaszcza o znacznych doptywach wód, stanowią bardzo poważne utrudnienie wykonawstwa robót budowlanych zarówno w obiektach inżynierii lądowej, jak i górnictwie. Niekiedy jedynym sposobem stabilizacji takiego ośrodka jest zamrożenie górotworu. Wytworzony płaszcz zamrożonej skały wówczas stanowi tymczasową obudowę wyrobiska i blokadę dla napływającej wody, umożliwiając wykonanie przewidzianych prac budowlanych.

Zamrażanie górotworu, zgodnie z [5], stanowi technikę wytworzenia sztucznej przegrody z występujących kurzawek, nawodnionych piasków, glin, ilów i skał zwięzłych. Przegroda taka, charakteryzująca się zwiększoną nośnością, szczelnością i stabilnością względem właściwości tych skał w stanie wcześniejszym, z których powstała, jest zdolna przejmować i przenosić siły od występujących obciążeń oraz odgradza przed napływem wód i zasypywaniem wyrobiska. Przegroda w postaci zamrożonej, zamkniętej powierzchni walcowej, ściany lub sklepienia, stwarza warunki do urabiania skał i uzyskania przestrzeni umożliwiającej realizację robót budowlanych, obejmujących wydrążenie wykopu i wykonanie stałej jego obudowy.

Metody zamrażania górotworu są wykorzystywane w budownictwie, przy realizacjach tuneli i metro [1], w górnictwie, zwłaszcza przy drążeniu szybów [11] oraz przy innych obiektach podziemnych. Czynniki mrozący dostarczane do rur mrozeniowych, zainstalowanych w otworach wywierconych w górotworze, powoduje obniżenie temperatury poniżej -5°C , w przestrzeni wykonywanego wykopu (wyrobiska). Dalej, w tle rozwoju technik zamrażania bardzo trudnego wykonawczo ośrodka skał płynnych i luźnych, przedstawiono metody, klasyczną z zastosowaniem solanki i kriogeniczną z rozprężaniem skroplonych gazów oraz scharakteryzowano zmienność parametrów fizycznych zamrożonych skał.

2. Rozwój metod mrożenia skał

Zamrażanie górotworu jako metoda stabilizacji ośrodka o niekorzystnych parametrach była już znana w latach 40. XIX w. Początkowo wykorzystywano naturalne warunki otoczenia z niskimi temperaturami zimą. W kopalniach złota na Syberii wykonywanie szybów polegało na stopniowym jego głębieniu [7]. Po skuciu zmarzniętej warstwy górotworu odkrytą powierzchnię pozostawiano na działanie mrozu (przez 2–3 dni). Po zamrożeniu warstwę skuwano i tak samo pozostawiając odkrytą powierzchnię na działanie mrozu, zamrażano warstwę kolejną, niżej (na ogół, na głębokość około 20 cm) znów

skuwano, zamrażano itd. Powtarzając działania, szyb drążono coraz głębiej. Średni miesięczny postęp głębienia takim sposobem był niewielki, wynosił 1 m do 1,5 m na miesiąc. Był to dość żmudny sposób, ale umożliwiał wykonawstwo robót w bardzo trudnych warunkach ośrodka, zwłaszcza w wodonośnych skałach luźnych i płynnych.

Koncepcja sztucznego mrożenia górotworu przy zastosowaniu specjalistycznych urządzeń technicznych najpierw była stosowana w Anglii. Podobnie, jak przy mrożeniu naturalnym, zamrażaniu podlegało dno drążonego szybów. Następnie sposób ten został zasadniczo zmodyfikowany, według rozwiązania niemieckiego inżyniera Friedricha Poetscha w 1883 roku [10]. Modyfikacja względem mrożenia naturalnego polegała na zastosowaniu pionowych przewodów mrozących wokół drążonego wyrobiska i zamrożeniu górotworu na całą planowaną głębokość. Na podobnej koncepcji bazują również obecnie stosowane metody mrozeniowe.

Na podstawie wierceń badawczych sięgających poza strefę przewidzianą do zamrożenia (np. poniżej nawodnionych bądź luźnych skał) ustala się niezbędną głębokość otworów na całym odcinkach lub obwodzie, aby utworzyły ściany bądź zamknięty krąg. Bardzo istotna jest precyzja wiercenia, z zachowaniem wymaganej odległości między otworami na całej ich głębokości, gdyż jest to warunek utworzenia ciągłego i zamkniętego, odpowiednio wytrzymałego płaszczu zmarzliny wokół przyszłego wyrobiska. W wywierconych otworach zostają zainstalowane rury mrozeniowe, do których z powierzchni terenu jest doprowadzane medium chłodzące.

W czasie mrożenia wyróżnia się dwa okresy:

- aktywnego schładzania górotworu, następnie
- biernego podtrzymywania ujemnej temperatury już schłodzonych (zamrożonych) skał.

W okresie aktywnym, inaczej wstępnym, ma miejsce schłodzenie i zamrożenie górotworu, które zależnie od zastosowanej metody trwa do kilku dni lub około miesiąca i dłużej. Prace główne, obejmujące drążenie i wykonywanie obudowy wyrobiska, są realizowane w okresie biernym, przy podtrzymywaniu obniżonej temperatury już schłodzonego górotworu. Zatem chłodzenie jest konieczne przez cały okres drążenia zamrożonego górotworu, konstruowania obudowy (w czasie zbrojenia, deskowania i betonowania), a także jeszcze w okresie dojrzewania betonu. Stan ciągłego zamrożenia stwarza niekorzystne warunki realizacyjne.

Szczególnie podczas zamrażania jest prowadzony monitoring procesu narastania pierścieni zmarzliny wokół poszczególnych otworów oraz ma miejsce odpowiednie sterowanie intensywnością ich chłodzenia, dla stworzenia zamkniętego płaszczu zmarzliny (lodowej). Naturalnie monitoring i sterowanie również są realizowane w okresie utrzymywania obniżonej temperatury.

Po wstrzymaniu dostarczania medium chłodzącego zamrożone skały w naturalny sposób rozmrażają się i powracają do poprzedniego stanu sprzed okresu mrożenia, w ciągu kilku tygodni.

W praktyce wykonawczej, zależnie od czynnika mrozącego, wyróżnia się dwie metody mrożenia:

- solanką, schładzaną w agregatach mrozeniowych i
- tzw. kriogeniczną, z rozprężaniem skroplonych gazów.

3. Mrożenie skał solanką

Mrożenie skał solanką schładzaną w agregatach mrozeniowych jest sposobem starszym – tradycyjnym. Czynnikiem chłodzącym są wodne roztwory soli, chlorku magnezu ($MgCl_2$), chlorku wapnia ($CaCl_2$) lub amoniaku (NH_3) o minimalnych temperaturach schłodzenia, odpowiednio do $-34^\circ C$ i do $-55^\circ C$.

Mrożenie odbywa się z powierzchni ziemi, przy zastosowaniu czynnika mrozącego, w postaci schłodzonej solanki przepływającej w rurach mrozeniowych. Ważnym aspektem metody jest dobór agregatów chłodniczych o dużych, niezbędnych wydajnościach, dostosowanych zarówno do okresu aktywnego schładzania górotworu, następnie do biernego podtrzymywania temperatury górotworu – już schłodzonego.

W okresie aktywnym mrożenia, na początku stosuje się solankę mniej schłodzoną, np. do temperatury $-15^\circ C$, następnie do temperatury niższej, np. $-30^\circ C$ lub do temperatury jeszcze mniejszej. Rozwiązanie takie umożliwia zastosowanie agregatów mrozeniowych o zredukowanych (względnie mniejszych) mocach. Pomimo takiego stopniowego schładzania ze względu na nierzadko podwyższone temperatury górotworu, duże ciepło właściwe skał, szczególnie wody oraz wysokie wartości ciepła zamrażania, jak też ogromne straty energii przy intensywnym przenikaniu ciepła do górotworu przez znaczną, schładzaną powierzchnię (termicznie niezaizolowaną) moce zastosowanych agregatów muszą być bardzo duże i nierzadko wynoszą kilka milionów watów. Takim przykładem jest stacja agregatów o mocy 3 MW, dla 40 otworów mrozeniowych (z zastosowaniem 1,8 tony amoniaku jako czynnika chłodniczego; rozruch instalacji nastąpił w 2013 r. [12]) przy mrożeniu szybu GG-1, głębionego do około 1350 m, najniżej w Legnickim Zagłębiu Miedziowym (rys. 1).



Rys. 1. Fragment stacji sprężarek z silnikami systemu schładzania solanki przy mrożeniu szybu GG-1 w Legnickim Zagłębiu Miedziowym [16]

Równocześnie przy tak dużych mocach agregatów czas zamrażania górotworu wynosi kilka miesięcy lub dłużej, zależnie od występujących warunków miejscowych.

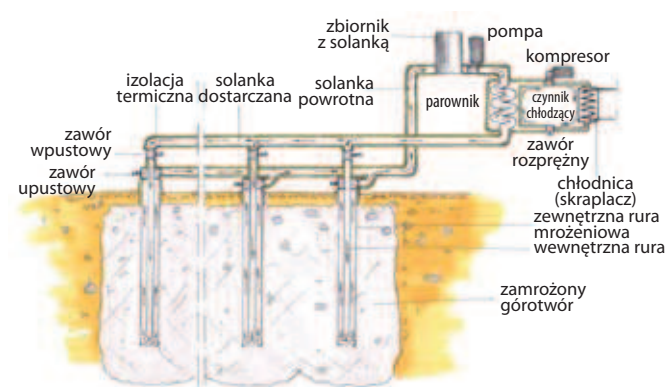
W przypadku metod z zastosowaniem solanki system tworzą:

- zespół sprężarkowych agregatów chłodniczych oraz
- instalacja solankowa z zespołem rur mrozących górotwór.

W agregacie chłodniczym (rys. 2) medium w fazie gazowej (gaz) kompresorem zostaje sprężony i w tzw. chłodnicy – schłodzony, aż do skroplenia. Skroplony gaz, w fazie ciekłej poprzez zawór rozprężny przepływa do parownika. W parowniku następuje rozprężenie, odparowanie i ogrzanie gazu. Ogrzany gaz znowu przechodzi przez sprężarkę i chłodnicę, gdzie następuje sprężenie, schłodzenie i ponowne skroplenie. Procesy te powtarzają się i przemiany są realizowane w sposób ciągły. Procesom rozprężenia, odparowania i ogrzania gazu, w parowniku agregatu chłodniczego, towarzyszy intensywna absorpcja energii cieplnej. Energia jest dostarczana (pobierana) od solanki, przepływającej przez tzw. wymiennik ciepła – chłodnicę. Solanka oddając energię cieplną (do ogrzania gazu w parowniku), zostaje mocno schłodzona, niekiedy nawet do temperatury $-50^\circ C$. Schłodzona solanka, poprzez system rurociągów izolowanych termicznie, jest pompowana do kolumn mrozeniowych, umożliwiających krążenie w nich medium chłodzącego. Solanka o niskiej temperaturze (na ogół poniżej $-20^\circ C$) przepływając w rurach mrozeniowych, umiejscowionych w górotworze, powoduje schładzanie i zamrażanie przylegających skał. Obniżanie temperatury i zamrażanie skał wiąże się z przejmowaniem od nich energii cieplnej. W rezultacie tej przemiany solanka ulega podgrzaniu. Po powrocie do agregatu chłodniczego ponownie zostaje schłodzona i znów pompowana do rur mrozących górotwór.

W okresie zamrażania jest prowadzony bardzo szczegółowy monitoring narastania pierścieni zmarzliny wokół poszczególnych otworów oraz tworzenia się zamkniętego płaszcza lodowej zmarzliny. Praca maszyn chłodniczych trwa przez cały okres realizacji robót w warstwach nawodnionych.

Przykładem dużego zamierzenia inwestycyjnego z zastosowaniem metody mrożenia było drażenie 31 szybu w Zagłębiu Miedziowym KGHM Polska Miedź SA (o głębokości około 1350 m i średnicy w świetle obudowy 7,5 m, w 7-letnim cyklu, z rozpoczęciem realizacji w 2010 roku [16]).



Rys. 2. Schemat instalacji mrozeniowej z zastosowaniem solanki

4. Mrożenie kriogeniczne skał z rozprężaniem skroplonych gazów

Mrożenie skał energią z rozprężenia skroplonych gazów oraz z ich ogrzania, tzw. kriogeniczne (nazwa, ze względu na występowanie bardzo niskich temperatur, poniżej -150°C), zostało spopularyzowane głównie w dwóch ostatnich dziesięcioleciach. Do zamrażania najczęściej jest stosowany skroplony azot. Niekiedy zamiennie wykorzystuje się skroplony dwutlenek węgla.

Azot – to składnik atmosfery w 78%, gaz nietrujący, bez smaku, bez zapachu, bezbarwny, niepalny (chemicznie obojętny, poza bardzo wysoką temperaturą, nieznacznie rozpuszczalny w wodzie). Skroplony azot, o nazwie handlowej LIN lub LN2, jest przemysłowo wytwarzany w stacjach separacji powietrza, gdzie poszczególne gazy zostają odseparowywane podczas destylacji frakcyjnej (przy wykorzystaniu różnic pomiędzy temperaturami ich wrzenia), schładzane do niższej temperatury oraz skraplane.

Zgodnie z [13] azot w temperaturach z przedziału od -196°C do -155°C i przy ciśnieniach odpowiednio – od atmosferycznego do około 20 barów, w postaci cieczy, jest przechowywany i transportowany w próżniowo izolowanych termicznie zbiornikach i cysternach. Przenikające z zewnątrz ciepło powoduje ogrzewanie ciekłego azotu i jego parowanie. Parowaniu towarzyszy intensywne pobieranie ciepła od pozostającej cieczy, tym samym następuje mocne jej schładzanie (ciepło parowania azotu wynosi $198,4\text{ kJ/kg}$). Automatyczne zawory umożliwiają uchodzenie odparowanego azotu na zewnątrz, zapobiegając nadmiernemu wzrostowi ciśnienia w zbiorniku. Na ogół, przy aplikacjach azotu w postaci ciekłej, stosowane są ciśnienia do 5 barów, zaś przy korzystaniu z fazy gazowej ciśnienia są wyższe, do 2 MPa. Schemat instalacji mrozącej z zastosowaniem ciekłego azotu pokazano na rysunku 3. Rozprężenie skroplonych gazów umożliwia bardzo intensywne dostarczenie dużych ilości energii i szybkie zamrożenie górotworu, w dużo niższych temperaturach, niż przy stosowaniu solanki [6]. Po schłodzeniu skał azot lub dwutlenek węgla jest uwalniany bezpośrednio do atmosfery, gdyż nie są to gazy toksyczne [1, 12].

Naturalnie zużycie energii również jest bardzo duże. W praktyce do odparowania 1 kg skroplonego azotu z górotworu jest

pobierane, jak wyżej, około 200 kJ energii, a następnie do ogrzania powstałego gazu (o ciepłe właściwym $1,04\text{ kJ/kg}\times^{\circ}\text{C}$) do temperatury zamrażania górotworu, zostaje pobrane od skał, jeszcze dodatkowo około 150 kJ. Na zużycie „ciekłego” azotu, przy zamrażaniu górotworu, mocno wpływają czynniki geologiczne, zwłaszcza rodzaj występujących skał, ich temperatura i przepływ wód. Stąd zużycie ciekłego azotu (LIN) jest mocno zróżnicowane i wynosi 1100–2500 litrów na 1 m^3 zamrażanego górotworu [6]. W drugiej fazie mrożenia, w okresie biernym, zużycie LIN jest znacznie mniejsze. Obszar zamrożonego górotworu zachowuje swoją objętość. Na podtrzymanie w stanie zamrożonym 1 m^3 skał potrzeba rozprężyć około 90 litrów LIN dziennie. Na ogół w okresie biernego chłodzenia niezbędne moce, zależnie od warunków realizacyjnych, są nawet do kilku razy mniejsze, niż w czasie aktywnego zamrażania [13, 14]. Po wstrzymaniu dozowania LIN zamrożony grunt energią cieplną przenikającą od otaczających skał rozmraża się i powraca do poprzedniego stanu w okresie kilku tygodni.

Metoda mrożenia kriogeniczna jest wygodniejsza, niż stosowanie solanki. Następuje szybsze zamrożenie skał. Okres zamrażania jest krótki i wynosi około 1 tygodnia (5–7 dni). Uzyskuje się wówczas zamkniętą i wodoszczelną ścianę o grubości około 1 m. Poza szybszym zamrożeniem zaplecze techniczne w metodzie kriogenicznej jest znacznie ograniczone, do zbiornika (-ów) skroplonego gazu i nie występuje konieczność, jak w metodzie solankowej, angażowania na budowie bardzo dużego potencjału zaplecza agregatów mrozących, o znacznych mocach, z długimi okresami czasu ich instalowania oraz demontażu.

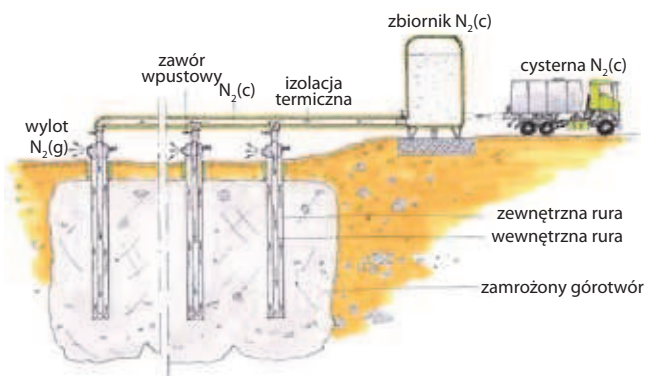
5. Zmiana parametrów fizycznych zamrożonych materiałów

Przy zamrożeniu następuje zmiana parametrów fizykotermicznych oraz wytrzymałościowych skał luźnych. Zamrożenie nawodnionych skał skutecznie je uszczelnia i następuje naturalna likwidacja przecieków, gdyż ewentualnie penetrująca woda ulega zmrożeniu, a powstały lód zamyka nieszczelności. Zasadniczemu polepszeniu ulegają charakterystyki wytrzymałościowe, umożliwiające przeniesienie dużych obciążeń. Zgodnie z [8] zamrażane materiały wraz z obniżaniem ujemnych temperatur mają coraz większe wytrzymałości doraźne na ściskanie (tab. 1).

Zamrożenie skał luźnych pełni trzy główne funkcje umożliwiające ich urabianie w niekorzystnych warunkach ośrodka:

- nośną, wynikającą ze zwiększenia parametrów wytrzymałościowych zamrożonych skał (względem stanu przed ich zmrożeniem),
- uszczelniającą, zwłaszcza przy występującym parciu wód,
- zabezpieczającą wykop przed jego zasypywaniem przez materiał luźny.

Wysoka wytrzymałość doraźna na ściskanie zamrożonych skał górotworu jest bardzo korzystna dla zachowania stateczności wyrobiska podczas wykonywania przewidzianych prac. Z drugiej zaś strony, ta wysoka wytrzymałość zamrożonych materiałów stanowi poważną trudność w ich usuwaniu oraz



Rys. 3. Schemat instalacji mrozącej z zastosowaniem skroplonego gazu

Tabela 1. Wytrzymałość doraźna na ściskanie wody i luźnych skał nawodnionych w różnych temperaturach zamrożenia [8]

Rodzaj skały	Wytrzymałość na ściskanie R_c [MPa]		
	-10°C	-15°C	-20°C
Czysty lód	1,2	1,8	2,1
Glina, il drobno uziarniony, piasek zailony	5,5	7,2	9,5
Drobno i średnio uziarniony piasek	8,7	13,3	15,3
Kwarcowy piasek	12,0	15,0	20,0

wymaga wykonywania robót w niekorzystnych, ujemnych temperaturach, ze stosowaniem specjalistycznego sprzętu do urabiania skał (rys. 4). Dodatkowo metoda ta stwarza termicznie niekorzystne warunki wykonania docelowej betonowej obudowy drążonego otworu [3, 4].

Przy zamrożeniu materiałów zasadniczej zmianie również ulega współczynnik przewodności cieplnej λ względem jego wartości w temperaturach dodatnich. Na przykład lód charakteryzuje się przewodnością cieplną 4 razy większą od wody i około 80 razy większą niż powietrze zawarte w porach [8]. Skutkuje to poważną zmiennością intensywności chłodzenia, zależnie od występujących warunków.

6. Posumowanie

Technika zamrażania pozwala na wykonanie wykopu i docelowej jego obudowy w gruntach, skałach płynnych i luźnych. Wówczas z występujących materiałów tego, wykonawczo trudnego ośrodka, wytwarza się sztuczną, stabilną przegrodę o zwiększonych – nośności i szczelności (np. wytrzymałość doraźna na ściskanie zmrożonego do temperatury -20°C nawodnionego piasku wynosi 20 MPa). Równocześnie jednak zamrożona skała stanowi poważną trudność przy jej odspajaniu i wymaga stosowania specjalistycznego sprzętu do urabiania, a wykonawstwo robót odbywa się w niekorzystnych, ujemnych temperaturach.

W klasycznej metodzie mrożenia skał solanką schładzaną w agregatach mrozeniowych czynnikiem chłodzącym są wodne roztwory soli, zazwyczaj chlorku wapnia (CaCl_2 , o możliwym schłodzeniu nawet do temperatury -55°C). Z uwagi na intensywną wymianę ciepła i dużą powierzchnię zamrażanych skał na budowie występuje konieczność stworzenia specjalistycznego zaplecza w postaci centrali licznych agregatów chłodniczych o dużych mocach, nawet do kilku MW (np. 3 MW przy mrożeniu, szybu w Legnickim Zagłębiu Miedziowym). Pomimo urządzeń o tak dużych mocach okres zamrażania górotworu wynosi kilka miesięcy.

Do mrożenia skał energią z rozprężenia skroplonych gazów oraz z ich ogrzania, tzw. metodą kriogeniczną, najczęściej jest stosowany skroplony azot (niekiedy zamiennie skroplony dwutlenek węgla). Gaz jest dostarczany w cysternach i przechowywany na budowie w zbiornikach izolowanych termicznie. Gaz w stanie ciekłym rozprowadzony izolowanymi rurociągami jest dozowany elektrozaworami do poszczególnych rur mrozeniowych. Duże ciepło parowania i bardzo niska temperatura skroplonego gazu umożliwiają szybkie schłodzenie i zamrożenie górotworu, na ogół w czasie około 1 tygodnia. Ilość energii potrzebna do zamrożenia górotworu (podobnie jak przy stosowaniu solanki) jest bardzo duża, stąd również



Rys. 4. Osprzęt do urabiania zmrożonej calizny górotworu [15]

zużycie ciekłego azotu wynosi nawet do 2500 litrów na 1 m³ zamrażanego górotworu.

Po zamrożeniu górotworu zasadniczej zmianie ulegają współczynniki przewodzenia ciepła poszczególnych materiałów względem ich wartości w temperaturach dodatnich. Skutkuje to potrzebą bieżącego dostosowania intensywności mrożenia.

W okresie drążenia wyrobiska i wykonywania obudowy (na ogół w temperaturach od -5°C do poniżej -15°C)

w tzw. drugiej fazie mrożenia zużycie skroplonego gazu jest znacznie mniejsze. W tym okresie, tj. mrożenia biernego, niezbędne moce, zależnie od warunków realizacyjnych, są nawet do kilku razy mniejsze, niż w czasie aktywnego zamrażania. Po wstrzymaniu dozowania skroplonego gazu zamrożony ośrodek energią cieplną przenikającą od otaczających skał rozmraża się i powraca do poprzedniego stanu w ciągu kilku tygodni.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Andersland B., Ladanyi B., Frozen Ground Engineering, 2nd edition, John, 2005
- [2] ENV 13670-1:2000 Wykonywanie konstrukcji betonowych. Część 1: Uwagi ogólne
- [3] Hajto D., Proficz P., Termicznie zróżnicowane warunki dojrzewania betonu w kontekście budownictwa podziemnego, Logistyka, 6/2014
- [4] Hajto D., Więckowski A., Właściwości betonu dojrzewającego w nienormowych warunkach kształtowanych przez górotwór, Przegląd Górniczy, 8/2014
- [5] Hydzik J., Czaja P., Betony nowej generacji w budownictwie podziemnym, Wydawnictwo Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, Kraków, 2010
- [6] Johansson T., Artificial ground freezing in clayey soil, Doctoral Thesis, Department of Civil and Architectural Engineering Royal Institute of Technology Stockholm, 2009
- [7] Kostrz J., Głębienie szybów specjalnymi metodami, Wydawnictwo Śląsk, Katowice, 1964
- [8] Krupiński B. i inni, Poradnik górnika. Tom 2, Wydawnictwo Śląsk, Katowice, 1975
- [9] PN-G-05015:1997: Szyby górnicze. Obudowa. Zasady projektowania
- [10] Reuther E.-U., Einführung in den Bergbau. 1. Auflage, Verlag Glückauf GmbH, Essen, 1982
- [11] Stachowiak-Maciejowska K., Technologie budownictwa podziemnego w działalności Przedsiębiorstwa Budowy Kopalń, Górnictwo i Geoinżynieria, rok 29, zeszyt 3/1, 2005
- [12] Stoss J., Valk. K., Uses and limitations of ground freezing with liquid nitrogen, Engineering Geology, tom 13, wydanie 1-4, 1979
- [13] www.air-liquide.pl
- [14] www.boc-gas.com.au
- [15] www.drumcutters.com
- [16] www.pebeka.pl