

*Andrzej Wichur**

UWAGI O PROJEKTOWANIU TECHNOLOGII ZAMRAŻANIA GÓROTWORU DLA POTRZEB GŁĘBIENIA SZYBÓW**

1. Wstęp

Po zakończeniu II wojny światowej w Polsce rozpoczął się ożywiony rozwój górnictwa, a w ślad za tym — budownictwa górniczego, zajmującego się wykonawstwem górniczych wyrobisk udostępniających i przygotowawczych (szyby, przecznice, główne chodniki transportowe) w czasie budowy i rozbudowy kopalń głębinowych. Powołanie przedsiębiorstw górniczych specjalizujących się w budownictwie górnicyzm było konsekwencją programów rozbudowy bazy surowcowej i energetycznej jako strategicznej gałęzi przemysłu, określanej następnie przez długie lata mianem przemysłu narodowego. W latach 1952–1994 wybudowano w Polsce [19] 24 kopalnie węgla kamiennego, kopalnie rud miedzi, kopalnie soli, tworząc od podstaw nowe regiony górnicze, takie jak np. Rybnicki Okręg Węglowy, Legnicko-Głogowski Okręg Miedziowy czy Zagłębie Lubelskie. Dla realizacji tych zadań inwestycyjnych stworzono odpowiednie zaplecze naukowo-badawcze, projektowe, a także powołano nowe kierunki studiów na uczelniach górniczych, kształcące słuchaczy w zakresie projektowania kopalń i budownictwa górniczego. Dzięki tym wszystkim działaniom możliwe było wykonanie olbrzymiego zakresu robót inwestycyjnych, często w bardzo trudnych warunkach geologiczno-górnicyzm [47]. W latach 1945–1989 ogółem zgłębiono ponad 260 km szybów i szybików, wydrążono ponad 90 tys. km wyrobisk korytarzowych i ponad 39 mln m³ wyrobisk komorowych. W okresie koniunktury na roboty górnicze, w latach 60. i 70., przedsiębiorstwa robót górniczych zatrudniały łącznie około 40 tys. osób, co stanowiło około 8÷10% ogółu zatrudnionych w górnicyzm podziemnym.

Pozyskane w czasie prowadzenia robót doświadczenia techniczne i technologiczne sprzyjały udoskonaleniu metod projektowania i unowocześnianiu technologii. W szczegól-

* Wydział Górnicyzm i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

** W pracy wykorzystano wyniki uzyskane w ramach pracy statutowej nr 11.11.100.588

ności dotyczyło to metod głębiania szybów, w tym metody zwykłej głębiania oraz metod specjalnych z zastosowaniem metody sztucznego zamrażania skał i cementacji wyprzedzającej.

Początek ostatniej dekady XX wieku — to okres transformacji ustrojowej i ekonomicznej naszego kraju. Okres ten dla polskiego górnictwa węglowego oznaczał konieczność dostosowywania się do zasad gospodarki rynkowej. Konsekwencją tych przedsięwzięć dla budownictwa podziemnego górnictwa było poważne ograniczenie zapotrzebowania na roboty podziemne — przykładowo w latach 1990–1997 redukcja zatrudnienia w przedsiębiorstwach robót górnictwa wyniosła ok. 70%, a roczna dynamika spadku zatrudnienia wynosiła od 12 do 23% [48]. Obecnie, gdy ocenia się, że zapotrzebowanie na roboty udostępniające w górnictwie spadło do najniższego technicznie możliwego poziomu [7], powraca konieczność podjęcia prac nad doskonaleniem pewnych wytypowanych technologii budownictwa górnictwa.

2. Głębianie szybów z użyciem metody zamrażania górotworu

Metoda zamrażania górotworu należy do grupy metod polegających na specjalnych zabiegach wyprzedzających, dzięki którym może być następnie zastosowana zwykła technologia głębiania. Doświadczenia krajowe wskazują, że może być ona stosowana praktycznie we wszystkich warunkach geologiczno-górnictwowych; jedynym ograniczeniem tutaj są koszty, które w wielu przypadkach czynią głębianie tą metodą nieopłacalną. Praktycznie metodę tę stosuje się przede wszystkim do głębiania szybów w skałach sypkich i mało spoistych zawodnionych oraz w skałach zwięzłych o bardzo dużych dopływach wody po wykluczeniu możliwości zastosowania innych specjalnych metod głębiania.

Wskazaniami zastosowania metody zamrażania górotworu są:

- występowanie skał kurzawkowych i innych sypkich i mało spoistych o współczynniku filtracji mniejszym od $1 \cdot 10^{-5}$ m/s,
- występowanie skał ilastych przewarstwionych skałami wodonośnymi o współczynniku filtracji mniejszym od $1 \cdot 10^{-5}$ m/s,
- występowanie skał zwięzłych wodonośnych o dużych wypływach pod znacznym ciśnieniem wody lub wody z drobnymi cząstkami skalnymi.

Przeciwwskazaniami zastosowania metody zamrażania górotworu są:

- wysoka temperatura wód podziemnych,
- znaczna prędkość przepływu wód w górotworze,
- znaczne zasolenie wód,
- duża głębokość (w obecnych warunkach — przekraczająca 1000 m).

Metoda głębiania szybów z użyciem zamrażania górotworu przeżyła w kraju w okresie powojennym okres burzliwego rozwoju. Przykładowo podaje się [25], że do roku 1960 me-

todę zamrażania górotworu zastosowano w przypadku 10% głębinowych szybów, a natomiast w latach 1971–1975 (zamykających okres dobrej koniunktury dla budownictwa kopalń) metoda ta była stosowana w 50% głębinowych szybów. Zmiana hydrogeologicznych warunków głębinienia (przede wszystkim wzrost grubości zawodnionego nadkładu) spowodowała rozwój metodyki projektowania procesu zamrażania górotworu, która została obszerniej omówiona w następnym rozdziale.

3. Stan badań nad zagadnieniem projektowania technologii zamrażania górotworu

Opisana 2 części artykułu metoda zamrażania górotworu zajmuje szczególne miejsce w technologii budownictwa szybowego. Trzeba jednak stwierdzić, że duży koszt zamrażania oraz złożoność tej technologii wskazuje na szczególną rolę projektowania w tym procesie.

Podstawowymi częściami metodyki projektowania procesu zamrażania górotworu są:

- dobór schematu technologicznego zamrażania górotworu (sposobu prowadzenia mrożenia górotworu),
- obliczenia parametrów procesu zamrażania,
- obliczenia parametrów instalacji mrozeniowej,
- dobór schematu technologicznego i obliczenia procesu rozmrażania górotworu.

W początkowym okresie projektowanie prowadzono w oparciu o normatyw [18], który w znacznej części oparto na metodzie projektowania opracowanej przez Trupaka-Pokrowskiego [20, 30–32]. Metoda ta, dopracowana i wydana w formie książkowej przez J. Kostrza [9] i J. Walewskiego [35], okazała się przydatna w praktyce przy zamrażaniu górotworu do głębokości 200÷300 m; w przypadkach większych głębokości obserwowano znaczące różnice między parametrami projektowymi i rzeczywistymi [11, 21]. W związku z projektowaniem głębinienia szybów w Lubelskim Zagłębiu Węglowym (LZW) z zastosowaniem zamrażania górotworu do głębokości 725 m [23] opracowano w Ośrodku Badawczo-Rozwojowym Budownictwa Górniczego „Budokop” nowe zasady projektowania zamrażania górotworu [22, 25, 26, 35], które pozostają w zasadzie niezmienione do chwili obecnej.

Ewolucja stosowanych schematów technologicznych zamrażania górotworu była związana ze zwiększeniem głębokości zamrażania — początkowo stosowano powszechnie schemat zamrażania z powierzchni na całą głębokość z normalnym obiegiem solanki. Schemat ten, zastosowany w przypadkach większych głębokości zamrażania (przekraczających 200÷300 m), prowadził do wydłużenia czasu zamrażania, spowodowanego powolnym zamrażaniem skał w górnej części profilu szybu. Polepszenie sytuacji przyniosło zastosowanie odwróconego obiegu solanki (potem zarzucone ze względu na skomplikowaną technikę przejścia na normalny obieg solanki po zgłębieniu początkowego odcinka szybu) oraz tzw. zamrażanie stopniowe (strefowe), polegające na stopniowym opuszczaniu rur ługowych, co powodowało przyspieszenie zamrażania górnego odcinka profilu szybu i umożliwiała

wcześniejsze rozpoczęcie robót głębiania. W przypadkach zamrażania głęboko położonych warstw o niewielkiej grubości próbowano zastosować schemat zamrażania odcinkowego — schemat ten nie upowszechnił się ze względu na skomplikowaną technikę i niepewność rezultatów.

Obecnie, po kilkudziesięciu latach doświadczeń, zalecane są dwa schematy zamrażania:

- 1) na całą głębokość z normalnym obiegiem solanki,
- 2) stopniowe (strefowe).

Obliczenia parametrów procesu zamrażania zawierają następujące podstawowe obliczenie:

- grubości płaszczu mrozeniowego,
- średnicy okręgu otworów mrozeniowych,
- bilansu cieplnego procesu zamrażania,
- wydajności urządzeń chłodniczych,
- czasu czynnego zamrażania górotworu.

W początkowym okresie użycia metody zamrażania górotworu do obliczania grubości płaszczu mrozeniowego stosowano [18] wzory oparte na teorii sprężystości (tzw. wzór Lamégo) oraz plastyczności (wzór Domkego). Dla warunków większych głębokości zamrażania i wzrostu obciążeń płaszczu mrozeniowego wzory te okazały się niezadowolające i w latach 60. wprowadzono [9, 35] do procesu projektowania tzw. wzór Libermana na grubość płaszczu mrozeniowego przy ograniczonej długości zabierki szybowej; wzór ten jest stosowany do chwili obecnej.

W dalszym toku procesu projektowania określa się średnicę okręgu otworów mrozeniowych. W rezultacie obliczeń grubości płaszczu mrozeniowego otrzymuje się również średnią wartość temperatury tego płaszczu, która stanowi punkt wyjściowy do zaprojektowania technologii zamrażania. Parametry geometryczne płaszczu oraz jego temperatura umożliwiają obliczenie bilansu cieplnego procesu zamrażania, sprowadzającego się w zasadzie do obliczenia ilości ciepła, którą należy odebrać od górotworu, aby uzyskać projektowany płaszcz mrozeniowy. Sposób obliczeń w tym przypadku nie uległ większym zmianom.

Poważne dyskusje wynikły natomiast w przypadku metody obliczeń wydajności urządzeń chłodniczych. Dobór wydajności cieplnej agregatów mrozeniowych w krajowej praktyce projektowej oparto na metodzie Trupaka–Pokrowskiego [20, 30–32], zgodnie z którą wydajność cieplną agregatów mrozeniowych (tzw. wydajność brutto) oblicza się według wzoru

$$Q_b = kq_f F \quad (1)$$

gdzie:

Q_b — wydajność brutto agregatów mrozeniowych (tzn. z uwzględnieniem strat ciepła), W,

k — współczynnik uwzględniający straty ciepła w sieci ($k = 1,1 \div 1,25$, zwykle $k = 1, 2$),
 F — sumaryczna powierzchnia rur mrozeniowych, m^2 ,
 q_f — współczynnik przenoszenia ciepła, W/m^2 , obliczany ze wzoru

$$q_f = \frac{T_s}{D_{mw} \left(\frac{1}{\alpha_m D_{mw}} + \frac{1}{2\lambda_z} \ln \frac{D_z}{D_{mw}} \right)} \quad (2)$$

gdzie:

T_s — temperatura solanki, $^{\circ}C$,
 D_{mw} — średnica wewnętrzna rury mrozeniowej, m ,
 D_z — średnica cylindra zamrożonej skały, m ,
 α_m — współczynnik przyjmowania ciepła od rury mrozeniowej do solanki, $W/(m^2 \cdot K)$,
 λ_z — średnia ważona przewodność cieplna zamrożonego górotworu, $W/(m \cdot K)$.

W obliczeniach projektowych zalecano [20] przyjmować:

$$q_f = 200 \div 250 \text{ kcal}/(m^2 \cdot h) = 233 \div 291 \text{ W}/m^2.$$

Z punktu widzenia fizycznego współczynnik przenoszenia ciepła q_f stanowi natężenie strumienia cieplnego przechodzącego przez zamrożony górotwór i przyjmowanego przez solankę w otworze mrozeniowym. W polskiej praktyce projektowej do wartości uzyskiwanej ze wzoru (1) dodawano jeszcze wartość tzw. strat w górotworze [9, 35], powstających wskutek stałego dopływu ciepła z otaczającego górotworu do zamrożonego cylindra skalnego. Na błędność takiego przyjęcia zwrócili uwagę K. Unrug i A. Tomiczek [33] stwierdzając, że wartość uzyskana ze wzoru (1) (bez współczynnika k) stanowi maksymalną ilość ciepła, którą płaszcz mrozeniowy może odprowadzić do solanki. Ci sami autorzy zakwestionowali również zalecane wartości współczynnika q_f , gdyż prowadzą do zaniżenia obliczeniowego czasu zamrażania górotworu [33] i zaproponowali następujący wzór

$$Q_b = k\rho cW(T_2 - T_1) \quad (3)$$

gdzie:

T_1, T_2 — temperatura solanki wlotowej, wylotowej, $^{\circ}C$,
 W — wydatek objętościowy solanki, m^3/s ,
 ρ — gęstość objętościowa solanki, kg/m^3 ,
 c — ciepło właściwe solanki, $J/(kg \cdot K)$.

Wzór (3) został uznany przez autorów [33] za wzór tymczasowy, zalecany do chwili dokładniejszego poznania procesu wymiany ciepła między solanką a górotworem.

W nowszej praktyce projektowej wzór (3) został zmodyfikowany [26] przez uwzględnienie w obliczeniach oporu cieplnego rury mrozeniowej oraz skały niezamrożonej (ochłodzonej). Wzór ten ma postać

$$q_{wi} = \frac{T_n - T_z}{\frac{1}{\alpha_n O_{wr}} + \frac{S_{mr}}{\lambda_m O_{mr}} + \frac{S_z}{\lambda_z O_z} + \frac{S_n}{\lambda_n O_n}} \quad (4)$$

gdzie:

- q_{wi} — obciążenie cieplne rury mrozeniowej na długości i -tej warstwy, W/m,
- O_{wr}, O_{mr}, O_z, O_n — odpowiednio wewnętrzny obwód rury mrozeniowej, średni obwód rury mrozeniowej, średni obwód górotworu zamrożonego, średni obwód górotworu ochłodzonego, m,
- S_{mr}, S_z, S_n — grubość rury mrozeniowej, górotworu zamrożonego, ochłodzonego, m,
- $\lambda_m, \lambda_z, \lambda_n$ — przewodność cieplna rury mrozeniowej, górotworu zamrożonego, ochłodzonego, W/(m·K).

Wydajność netto agregatów mrozeniowych należy obliczać ze wzoru [26]

$$Q_n = n \sum_{i=1}^{n_w} q_{wi} l_i \quad (5)$$

gdzie:

- n — liczba otworów mrozeniowych,
- n_w — liczba warstw mrożonych,
- l_i — długość rury mrozeniowej na grubości i -tej warstwy, m.

Wydajność brutto agregatów mrozeniowych (według [26] zapotrzebowanie mocy chłodniczej instalacji) należy dalej obliczać ze wzoru

$$Q_b = \frac{K Q_n}{c_1 c_2} \quad (6)$$

gdzie:

- K — współczynnik nierównomierności pracy instalacji,
- c_1 — współczynnik strat instalacji chłodniczej,
- c_2 — współczynnik strat instalacji czynnika chłodzącego (ziębiwa)

(w wytycznych [26] nie podano wartości tych współczynników).

E. Posyłek zaproponował [22] jeszcze jeden wzór do obliczania optymalnej wydajności agregatów mrozeniowych.

Wzór ten ma postać

$$Q_n = \beta_c \Delta T H n \quad (7)$$

gdzie:

- β_c — współczynnik przejmowania ciepła na 1 m otworu mroźniowego, W/(m·K),
- H — głębokość zamrażania, m,
- n — liczba otworów mroźniowych,
- ΔT — średnia różnica temperatur pomiędzy solanką w przestrzeni międzyrurowej a skałą w sąsiedztwie rury mroźniowej, °C.

Autor pracy [22] zaleca przyjmować dla:

- przepływu laminarnego: $\Delta T = 4 \div 5^\circ\text{C}$,
- przepływu burzliwego: $\Delta T = 0,8 \div 1,0^\circ\text{C}$.

W innym miejscu pracy [22] autor proponuje obliczać wydajność agregatów mroźniowych według wzoru

$$Q_n = \frac{Q}{t} \quad (8)$$

gdzie:

- Q — całkowita ilość ciepła odprowadzana z górotworu zamrożonego i ochłodzonego, J,
- t — czas zamrażania aktywnego, s.

W przeglądzie metod doboru wydajności agregatów mroźniowych nie uwzględniono skomplikowanych modeli analogowych [16] lub numerycznych [11, 21, 28, 31], które nie znalazły zastosowania w praktyce projektowej. W ostatnich latach A. Wichur uzyskał [43] rozwiązanie wiążące wydajność netto urządzeń chłodniczych z tzw. wewnętrzną wymianą ciepła — rozwiązanie to, zweryfikowane praktycznie w warunkach Lubelskiego Zagłębia Węglowego, może być zastosowane w praktyce projektowej.

W zakresie projektowania instalacji mroźniowej zaproponowano i wdrożono [25, 26] wzory optymalizujące proces zamrażania górotworu:

- wzór wiążący temperaturę zamrażania z warunkami temperaturowymi w miejscu zabiegu

$$|T_z| \geq |T_n| + |T_o| \quad (9)$$

gdzie:

- T_z — temperatura zamrażania (temperatura solanki), °C,
- T_n — temperatura naturalna górotworu na danej głębokości, °C,
- T_o — temperatura zamrażania skały, °C.

- wzór optymalizujący dobór średnicy rury mrozeniowej i ługowej ze względu na minimalizację strat ciśnienia w otworze mrozeniowym

$$d_w = X \cdot D_w \quad (10)$$

gdzie:

- d_w, D_w — średnica wewnętrzna rury — odpowiednio ługowej i mrozeniowej,
- X — współczynnik zależny od charakteru przepływu solanki ($X = 0,584 \div 0,646$).

Proces rozmrażania górotworu również ewoluował — zrezygnowano z tzw. rozmrażania naturalnego ze względu na brak możliwości sterowania procesem.

Obecnie stosuje się rozmrażanie sztuczne realizowane dwoma metodami:

- 1) zastosowaniem podgrzanej solanki,
- 2) ogrzewaniem wnętrza szybu powietrzem, parą wodną lub wodą.

W wyniku ewolucji metodyki projektowania procesu zamrażania górotworu sformułowano i wdrożono praktycznie pewne zasady optymalizacji tego procesu, z których najważniejsze są następujące [22, 23]:

- zastosowanie rur mrozeniowych stalowych i rur ługowych polietylenowych o średnicach powiązanych wzorem (10),
- zwiększenie wydatków przepływu solanki w otworach mrozeniowych aż do osiągnięcia przepływu burzliwego (lub przejściowego) o liczbie Reynoldsa $R_e \geq 3500$,
- znaczne zwiększenie mocy chłodniczej agregatów mrozeniowych,
- zastosowanie dwustopniowych agregatów mrozeniowych z możliwością obniżenia temperatury solanki do -40°C ,
- zastosowanie zróżnicowanego reżimu pracy agregatów mrozeniowych: w początkowym okresie praca przy maksymalnej wydajności chłodniczej (i maksymalnej temperaturze solanki), w końcowym okresie — domrażanie przy minimalnej temperaturze solanki (i minimalnej wydajności chłodniczej).

Opracowano i praktycznie wdrożono system kontroli procesu zamrażania górotworu [1, 6, 22, 23, 26]. Rozwiązania wymagało wiele problemów technicznych związanych z wierceniem i wyposażeniem otworów mrozeniowych (m.in. zmniejszenie odchyłeń od pionu i zwiększenie szybkości wiercenia, łączenie rur w sposób zapewniający szczelność i wytrzymałość złącza, cementacja rur mrozeniowych) [13, 24, 29]. Rozpoczęto również badania nad ekonomiczną stroną procesu zamrażania skał [5]. Największym osiągnięciem technologicznym było udane zamrażanie górotworu dla potrzeb głębinowania szybów w LZW [23].

Odrębnym problemem jest obudowa technologiczna szybów głębinowych z użyciem metody zamrażania górotworu. W początkowym okresie stosowania metody używano [9] klasycznej obudowy tymczasowej złożonej z pierścieni wykonanych z ceowników. Obudowa ta okazała się nieskuteczna w przypadku nieco głębszych mrożeń, na co zwracał już uwagę

J. Kostrz [9]. Nadmierna podatność tej obudowy powodowała niebezpieczeństwo rozszczelnienia rur mroźniowych z wszystkimi tego konsekwencjami — aż do zatopienia szybu włącznie. Oprócz tego klasyczna obudowa tymczasowa nie stanowiła odpowiedniego podłoża do wykonania hydroizolacji koniecznej w przypadku szybów głębinowych z użyciem metody zamrażania górotworu. Wprowadzono zatem w latach sześćdziesiątych tzw. obudowę wstępną, wykonaną z muru z cegły, betonitów lub betonu (w okresie późniejszym również z prefabrykatów — paneli), znacznie sztywniejszą, która gwarantowała dobre podparcie płaszcza mroźniowego i nie dopuszczała do nadmiernych deformacji rur mroźniowych oraz stanowiła dobre podłoże dla hydroizolacji. Zastosowanie na dużą skalę obudowy betonowej (wstępnej i ostatecznej) wykonywanej w górotworze zamrożonym stało się możliwe dzięki pracom wykonanym m.in. w ówczesnym Zakładzie Badań i Doświadczeń Budownictwa Górniczego [27] oraz w Przedsiębiorstwie Budowy Szybów [8]. Osiągnięto w ten sposób znaczące wyniki ekonomiczne, związane z ograniczeniem zakresu stosowania obudowy tubingowej — obudowa betonowa szybów tzw. wysokich marek stała się polską specjalnością [8, 15]. Badania nad zagadnieniem wodoszczelności obudowy betonowej szybów zostały podsumowane w pracach [14, 23]. Projektowanie obudowy szybowej dla warunków dużych grubości zawadzonego nadkładu było utrudnione, gdyż zastosowanie w tych przypadkach klasycznych wzorów prowadziło do nadmiernych grubości obudowy — przeprowadzone w tym kierunku badania doprowadziły do opracowania nowej metodyki obliczania obudowy szybów, która stała się podstawą nowych norm branżowych projektowania obudowy szybów [37, 39]. W badaniach wykorzystano m.in. wyniki pomiarów tensometrycznych w obudowie szybów [17, 40] oraz koncepcję ujęcia zjawisk ciśnienia górotworu na obudowę szybu przy użyciu teorii funkcji losowych [36, 38]. Na opracowaną metodykę obliczania obudów szybowych miały również wpływ badania innych autorów [2–4, 12, 34]. Przy głębinieniu szybów w Lubelskim Zagłębiu Węglowym wystąpiły poważne problemy z uszkodzeniami obudowy wstępnej, związanymi z deformacjami górotworu w czasie zamrażania. Ilościowe wyjaśnienie tego zjawiska podano w pracy [41], a metodę projektowania obudowy wstępnej ogłoszono w pracy [45]. W wyniku dalszych badań opracowano uproszczoną metodę projektowania obudowy wstępnej w warunkach LZW [10]. Doświadczenia głębinienia szybów w LZW w warunkach zamrażania górotworu do dużych głębokości (przekraczających 700 m) wskazały na potrzebę wymiarowania obudowy wstępnej w oparciu o dokładniejszą analizę stanu naprężenia i odkształcenia w strefie przodkowej — przeprowadzone nad tym zagadnieniem badania w AGH zostały omówione w pracach [41, 42, 44, 46]. Obecny stan techniki pozwala na bezawaryjne głębinienie szybów z użyciem zamrażania górotworu do głębokości 1000 m.

4. Podsumowanie

Doświadczenia stosowania metody zamrażania górotworu oraz nagromadzone wyniki badań i zapotrzebowanie na stosowanie tej technologii uzasadniają potrzebę opracowania udoskonalonych zasad projektowania technologii zamrażania górotworu dla głębinienia szybów w warunkach zawadzonego nadkładu o dużej grubości.

Zasady te powinny opierać się na opracowanych wcześniej wytycznych [26], które wykazały swą przydatność przy projektowaniu zamrażania górotworu w warunkach LZW.

W nowych zasadach powinny być w szczególności uwzględnione następujące wyniki prac badawczych:

- analizy wpływu strat ciepła na wartość projektowanej wydajności agregatów mrozeniowych,
- określania zasięgu górotworu ochłodzonego,
- uwzględnienia wewnętrznej wymiany ciepła w obliczeniach wydajności netto urządzeń chłodniczych.

LITERATURA

- [1] *Bajor W., Kryniowicz M., Menzel B., Wolańska T.*: Kontrola stanu zamrożenia górotworu metodą geoakustyczną. *Budownictwo Węglowe — Projekty Problemy*, 5, 1988
- [2] *Chudek M.*: Przyczynek do zagadnień współpracy obudowy tubingowo-betonowej. *Archiwum Górnictwa*, 2, 1963
- [3] *Chudek M.*: Wodoprzepuszczalność obudowy murowej szybów. *Przegląd Górnictwa*, 3, 1963
- [4] *Chudek M.*: Rozkład naprężeń w kołowej murowej obudowie pionowych wyrobisk górniczych. *Przegląd Górnictwa*, 2, 1964
- [5] *Duda Z., Kuśnierz J., Mięgowicz M.*: Ekonomika procesu zamrażania skał dla potrzeb głębiania szybów. Zarząd Główny Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Górnictwa Główna Komisja Budownictwa Górniczego, Zjednoczenie Budownictwa Górniczego, Konferencja naukowo-techniczna, Nowoczesne technologie w budownictwie górniczym 78, Materiały konferencyjne, 22–23 maja 1978 (Kokotek k. Lublińca)
- [6] *Głowacz K.*: Aparatura akustyczna dla kontroli stopnia zamrażania skał w LGOM. *Budownictwo Górnicze*, 3, 1971
- [7] *Grodecki W., Madryas C., Tajduś A., Wichur A., Tokarz A., Żyliński R.*: Wybrane problemy budownictwa podziemnego. *Budownictwo Górnicze i Tunelowe*, XI, 4, 2005, 5–13
- [8] *Grzymalski K.*: Wyniki stosowania betonów wysokich marek do obudowy szybów mrożonych. *Biuletyn Informacyjny Zjednoczenia Budownictwa Górniczego*, 1/2 (15/16), 1961
- [9] *Kostrz J.*: Głębianie szybów specjalnymi metodami. Katowice, Wydawnictwo „Śląsk” 1964
- [10] *Krywult J., Wichur A.*: Uproszczona metoda projektowania obudowy wstępnej szybów głębiowych z użyciem metody zamrażania górotworu. *Przegląd Górnictwa*, 5, 1993
- [11] *Kuśnierz J.*: Projektowanie optymalnych parametrów procesu zamrażania górotworu z zastosowaniem EMC. Prace Komisji Górniczo-Geodezyjnej, *Górnictwo* 24, Wybrane zagadnienia z budownictwa podziemnego, Polska Akademia Nauk Oddział w Krakowie, Ossolineum, Wrocław – Warszawa – Kraków – Gdańsk – Łódź 1986
- [12] *Kwaśniewski M.*: Obliczanie betonowej obudowy szybowej w świetle rozważań teoretycznych oraz badań modelowych. *Zeszyty Naukowe AGH, Górnictwo*, 68, 1975
- [13] *Machowski M.J.*: Nowe konstrukcje kolumn rur mrozeniowych. Prace Komisji Górniczo-Geodezyjnej, *Górnictwo* 24, Wybrane zagadnienia z budownictwa podziemnego, Polska Akademia Nauk Oddział w Krakowie, Ossolineum, Wrocław – Warszawa – Kraków – Gdańsk – Łódź 1986
- [14] *Majchrowicz R.*: Problemy wodoszczelności betonowej obudowy w szybach głębiowych metodą mrozeniową. *Budownictwo Górnicze*, 2, 1973 (wkładka)
- [15] *Majka R., Bartecki P.*: Rozwój podziemnego budownictwa górniczego w Polsce Ludowej. *Budownictwo Górnicze*, 3(71), 1974
- [16] *Mańkowskij G.I.*: Special'nye sposoby sooruzenija stvolov šacht. Moskwa, Nauka 1965
- [17] *Mizia A., Plebankiewicz J., Wichur A.*: Montaż aparatury tensometrycznej w nadkładowej partii obudowy szybu VII kop. „Zofiówka”. *Budownictwo Górnicze*, 2, 1969
- [18] Normatyw techniczny projektowania budownictwa. Głębianie szybów metodą mrożenia, nr NT-622/VI-50, Katowice 1956 (praca niepublikowana)
- [19] *Pękacki W., Rycman S., Tokarz A.*: Polskie budownictwo górnicze — doświadczenia i przyszłość. *Budownictwo Górnicze i Tunelowe*, nr 2, 1996

- [20] *Pokrovskij N.M.*: Sooruzhenie i rekonstrukcija gornych vyrabotok, č. III. Moskva, Gosgortechizdat 1963
- [21] *Posylek E.*: Charakterystyka metody analogii hydraulicznych w obliczeniach procesów zamrażania górotworu. *Budownictwo Górnicze*, 4 (56), 1970
- [22] *Posylek E.*: Studium optymalizacji parametrów procesu zamrażania górotworu do dużych głębokości. Mysłowice, Prace ZBiD-BG 1974
- [23] *Posylek E.*: Zamrażanie górotworu do dużych głębokości w LZW. Projekty — Problemy Budownictwo Węglowe, 2, 1979
- [24] *Posylek E., Wichur A.*: Kierunki rozwoju budownictwa szybowego w Polsce w świetle obrad IV Sympozjum. Specjalne problemy głębienia szybów i techniki iniekcyjnej. Projekty — Problemy Budownictwo Węglowe, 11–12, 1977
- [25] *Posylek E., Wolańska T.*: Nowe zasady projektowania zamrażania górotworu (Artykuł dyskusyjny). Projekty — Problemy Budownictwo Węglowe, 6, 1978
- [26] *Posylek E. i in.*: Wytyczne projektowania głębienia szybów metodą zamrażania górotworu. Zjednoczenie Budownictwa Górniczego, Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Budownictwa Górniczego Budokop, Mysłowice 1978 (praca niepublikowana)
- [27] *Rulka K., Godziek J.*: Problemy obudowy betonowej w szybach mroźniowych. *Rudy i Metale Nieżelazne*, 4, 1969
- [28] *Skladzień J.*: Analiza cieplna mrożenia górotworu. *Budownictwo Węglowe Projekty — Problemy*, 5, 1984
- [29] *Strzelecki Z.*: Laboratoryjne badania mroźniowych rur opadowych z tworzyw sztucznych. *Biuletyn Informacyjny Zjednoczenia Budownictwa Górniczego*, 3 (33), 1964
- [30] *Trupak N.G.*: Zamorażivanie gornych porod pri prochodke stvolov. Moskva, Ugletechizdat 1954
- [31] *Trupak N.G.*: Zamorażivanie porod pri sooruzhenii vertikal'nych šachtnych stvolov. Moskva, Nedra 1983
- [32] *Trupak N.G., Chakimov Ch.R.*: Zamorażivanie gruntov pri prochodke stvolov šacht. Moskva, Ugletechizdat 1950
- [33] *Unrug K., Tomiczek A.*: Krytyka sposobu obliczania bilansu cieplnego w metodzie zamrażania górotworu (Artykuł dyskusyjny). Projekty — Problemy Budownictwo Węglowe, 7–8, 1976
- [34] *Unrug K.F.*: Zasady obliczania obudowy betonowej i żelbetowej szybów w świetle badań modelowych. *Zeszyty Naukowe AGH*, 334, *Górnictwo*, 38, 1971
- [35] *Walewski J.*: Projektowanie szybów i szybków. Katowice, Wydawnictwo Śląsk 1965
- [36] *Wichur A.*: Ciśnienie górotworu na obwodzie obudowy szybu jako normalna stacjonarna funkcja losowa. *Archiwum Górnictwa*, 1, 1970
- [37] *Wichur A.*: Nowa metodyka obliczania obudowy szybowej w świetle opracowanych nowych norm branżowych. *Budownictwo Górnicze*, 2, 1972
- [38] *Wichur A.*: Nowa koncepcja matematycznego ujęcia zjawisk ciśnienia górotworu na obudowę szybów przy użyciu teorii funkcji losowych. *Przegląd Górniczy*, 10, 1972
- [39] *Wichur A.*: Zasady wymiarowania obudowy zespolonej i wielowarstwowej szybów. Projekty — Problemy Budownictwo Węglowe, 1, 1977
- [40] *Wichur A.*: Pomiar parametrów mechanicznych obudowy szybowej w trudnych warunkach hydrogeologicznych. Projekty — Problemy Budownictwo Węglowe, 3, 1979
- [41] *Wichur A.*: Stan naprężenia i przemieszczenia rur mroźniowych spowodowany odkształceniami zamrożonego górotworu w strefie przodkowej nie zabezpieczonej obudową. PAN Oddz. w Krakowie, Prace Komisji Górniczo-Geodezyjnej, *Górnictwo* 23, Wybrane zagadnienia z górnictwa podziemnego i odkrywkowego, Wrocław – Warszawa – Kraków – Gdańsk – Łódź 1983
- [42] *Wichur A.*: Badania teoretyczne współpracy betonowej obudowy wstępnej szybów z płaszczem mroźniowym. PAN Oddz. w Krakowie, Prace Komisji Górniczo-Geodezyjnej, *Górnictwo* 29, Wybrane zagadnienia z górnictwa, Wrocław – Warszawa – Kraków 1992
- [43] *Wichur A.*: Research on the engineering method of the units' refrigerating capacity selection in underground building. *Archives of Mining Sciences*, 1, 1997
- [44] *Wichur A., Czaja P., Poprawski W.*: Wytyczne projektowania grubości płaszcza mroźniowego. OBRBG Budokop w Mysłowicach, Konferencja Naukowo-Techniczna Budownictwo górnicze i podziemne w nowych warunkach gospodarowania, Materiały konferencyjne i referaty problemowe, Kokotek k/Lublińca 16–17.IX.1991
- [45] *Wichur A., Krywult J., Stapor J., Domańska D.*: Zasady projektowania obudowy wstępnej szybów głębionych z użyciem metody zamrażania górotworu. OBRBG Budokop w Mysłowicach, Konferencja naukowo-techniczna. Budownictwo górnicze i podziemne w nowych warunkach gospodarowania, Materiały konferencyjne i referaty problemowe, Kokotek k/Lublińca 16–17.IX.1991

- [46] *Wichur A., Poprawski W.*: Określenie grubości płaszcza mroźniowego z punktu widzenia zjawisk zachodzących w strefie przodkowej głębionego szybu. PAN Oddz. w Krakowie, Prace Komisji Górniczo-Geodezyjnej, *Górnictwo* 28, Wybrane zagadnienia z górnictwa, Wrocław – Warszawa – Kraków 1991
- [47] *Wichur A., Żyliński R.*: Underground Construction in Poland — Achievements and Perspectives of Development. Konferencja Naukowo-Techniczna. Budownictwo Podziemne 2000 — Underground Construction 2000. Akademia Górniczo-Hutnicza Wydział Górniczy Zakład Projektowania, Budownictwa, Ekonomiki i Zarządzania w Górnictwie, Główna Komisja Budownictwa Górniczego ZG SITG, Koło Zakładowe SITG przy AGH, Podkomitet Budownictwa Podziemnego Polskiego Komitetu Geotechniki, Polskie Towarzystwo Mechaniki Skał, Kraków, 25–27 września 2000, 612–623
- [48] *Żyliński R.*: Budownictwo górnicze w Polsce — szanse i zagrożenia. *Budownictwo Górnicze i Tunelowe*, 3, 1998