ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1969
Seria: GÓRNICTWO z. 37 Nr kol. 246

KAZIMIERZ RUŁKA

BADANIA NAD OKREŚLENIEM RZECZYWISTEGO PRZEBIEGU PROCESÓW WYMIANY CIEPŁA ORAZ DOJRZEWANIA BETONU W OBUDOWIE SZYBÓW GŁĘBIONYCH METODĄ MROŻENIOWĄ

Streszczenie. Dotychczasowe badania nad określeniem przebiegu procesów wymiany ciepła oraz dojrzewania betonu ułożonego w górotwór zamrożony, posiadały charakter czysto laboratoryjny. Uzyskane tą drogą wyniki z uwagi na zbyt duże niedokładności odwzorowania były dalekie od stanu rzeczywistego jaki spotyka się przy betonowaniu obudowy szybów mrożeniowych.

Uzyskane przez autora wyniki badań w modelu termosie, a następnie w warunkach in situ, których fragmenty przedstawione w niniejszej publikacji pozwoliły na wyjaśnienie rzeczywistego przebiegu tych procesów.

Poznanie drogą badań charakteru krzywych przebiegu wymiany ciepła pomiędzy betonem i górotworem zamrożonym pozwala na znacznie dokładniejsze ujęcie analityczne tych zjawisk, a tym samym dokładniejsze ich projektowanie oraz świadome sterowanie przebiegiem przedmiotowych procesów.

1. Zagadnienia betonowania obudowy szybów głębionych z zastosowaniem metody zamrażania skał

Od roku 1960 notujemy w krajowym budownictwie szybowym stały dynamiczny rozwój technologii wykonywania obudowy betonowej i to zarówno w szybach głębionych metodami zwykłymi jak i z zastosowaniem metod specjalnych. Wykonanie obudowy betonowej w szybach głębionych metodami zwykłymi (marki betonów 170-300) nie przedstawia większych trudności i można uznać już dzisiaj za opracowane. Znacznie trudniejsze jest opanowanie technologii układania i pielęgnowania masy betonowej przy wykonywaniu obudowy betonowej szczelnej o wysokiej wytrzymałości w szybach głębionych z zastosowaniem metody zamrażania skał.

W chwili obecnej tak się składa, że w najważniejszych okręgach górniczych jak Rybnicki Okręg Węglowy czy Dolnośląski Okręg Miedziionośny gdzie głębi się większość szybów, występują szczególnie trudne warunki hydrogeologiczne. W nadkładzie o grubości 150-450 m występują duże ilości skał słabozwięzłych i luźnych oraz kilka poziomów wodonośnych przy ciśnieniu hydrostatycznym dochodzącym do 30 atn. Sumaryczne ciśnienie skał i wody obliczone wg znanych wzorów dochodzi niejednokrotnie w tych warunkach do 60 atn. Takie warunki kwalifikują w zasadzie do zastosowania przy głębieniu metod specjalnych, a w szczególności metody mrożeniowej zaś jako obudowy tubingów żeliwnych staliwnych, bądź obudowy stalowo-betonowej. Deficyt stali oraz wysokie ceny tego doskonałego tworzywa budowlanego, skłoniły konstruktorów oraz technologów pracujących w budownictwie szybowym do poszukiwań rozwiązania obudowy na innej bazie.

Wybór padł na betony szczelne o wysokiej wytrzymałości tzw. hydrobetony. I tak na przestrzeni ostatnich kilku lat problem samego wykonywania betonów szczelnych o wysokiej wytrzymałości Rw "400" oraz ich transportu na miejsce betonowania został w zasadzie rozwiązany. Receptura tego betonu została oparta na kruszywach łamanych (granit, bazalt lub andezyt) frakcjonowanych i cemencie portlandzkim marki "350".
Szczególną zasługę w rozwiązaniu tej części zadania miały Działy Studiów oraz laboratoria przyzakładowe takich przedsiębiorstw wykonawczych jak: Przedsiębiorstwo Budowy Szybów - Bytom, Przedsiębiorstwo Robót Górniczych - Mysłowice oraz Przedsiębiorstwo Budowy Kopalń Rud - Lubin.

Do rozwiązania jednak pozostały problemy cieplne oraz zagadnienia projektowania i kontroli przebiegu procesów wiązania i twardnienia betonu ułożonego w górotworze zamrożony zwłaszcza w początkowym okresie jego dojrzewania.
Aby przedstawić w sposób najprostszy przedmiotowe zjawiska należy pokrótce scharakteryzować zarówno górotwór zamrożony jak i układaną w bezpośredniej lub pośredniej styczności masę betonową.

Charakterystyka zamrożonego górotworu

Najczęściej spotykanym sposobem odcinania wód gruntowych i zestalania słabych warstw górotworu przy głębieniu szybów jest zamrażanie za pomocą pionowych otworów mrożeniowych, okalających miejsce robót jednym lub dwoma pierścieniami. Efektem zamrażania jest odpowiedniej grubości płaszcz lodowy. Warunki betonowania obudowy w takim środowisku są bardzo trudne ze względu na bezpośredni kontakt świeżo ułożonej masy betonowej z górotworem, który jako nasycony wodą jest dobrym przewodnikiem ciepła (współczynnik przewodnictwa λ= 1,5-3,0 Kcal/m godz. ^{o}C). Niebezpieczeństwo grozi w tych warunkach zarówno betonowi (przedwczesne zamrożenie czy penetracja agresywnych wód z rozstającego górotworu do świeżo ułożonej masy betonowej) jak i płaszczowi lodowemu, którego grubość może się wydatnie zmniejszyć skutkiem nadmiernego podgrzewania składników betonu i ciepła hydratacji cementu co może spowodować uszkodzenie rur mrożeniowych, osunięcie się skał czy przerwaniem wody do szybu.

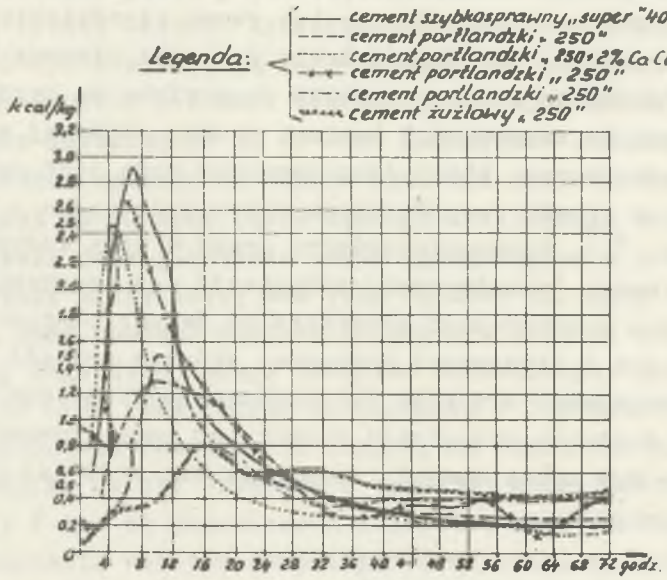
Charakterystyka masy betonowej

Jak wiadomo z punktu widzenia charakterystyki cieplnej masa betonowa ułożona w konstrukcję obudowy jest ośrodkiem czynnym, ze względu na egzotermiczność reakcji hydratacji cementu. W reakcji tej dla rozmaitych gatunków cementu i różnych temperatur początkowych masy betonowej, różny jest początek wydzielania ciepła, przebieg intensywności wydzielania, jak również ilość wydzielonego ciepła choć charakter samego zjawiska jest podobny. Przykładowe krzywe wzrostu ilości ciepła wydzielonego przez różne cementy krajowe w trakcie hydratacji stosowane do wykonywania obudowy przedstawiono na rys. 1.

Praktyka ostatnich lat wykazała, że wykonanie szczelnej i wytrzymałej obudowy betonowej w szybach mrożeniowych napotyka na trudności i wymaga rozwiązania drogą badawczo-projektową wielu problemów z których najważniejsze to:

- zbadanie warunków cieplnych dojrzewania betonu w czasie od ułożenia go w obudowę do chwili spadku temperatury do $\pm$ 0°C,

- ustalenie na tej podstawie stopnia dojrzewania betonu w momencie jego zamarzania w celu ewentualnego zastosowania odpowiednich środków dla zmiany warunków dojrzewania,



Rys. 1. Wykres egzotermii dla różnych rodzajów cementów krajowych stosowanych do wykonywania obudowy szybowej

- zbadanie grubości warstwy górotworu, która ulegnie rozmrożeniu wskutek wymiany cieplnej z dojrzewającym betonem, w celu zapewnienia bezpiecznej grubości płaszcza lodowego.

Nad rozwiązaniem tych właśnie problemów pracuje Zakład Badań i Doświadczeń Budownictwa Górniczego. Dzięki uzyskanym wynikom odpowiednio zaprogramowanych i wykonanych badań modelowych w tzw. "modelu - termosie" oraz w warunkach naturalnych, które przedstawiono poniżej, można już dzisiaj z wystarczającą doskonałością określać na drodze badawczej bądź analitycznej rozkład temperatur w poszczególnych warstwach (betonu i górotworu) biorących udział w wymianie cieplnej a na jego podstawie wnioskować o wytrzymałości obudowy betonowej szybu mrożeniowego oraz sterować przebiegiem całego procesu, wymiany cieplnej i dojrzewania w trakcie betonowania, poprzez świadome

korygowanie bilansu cieplnego. Kolejne fazy rozwiązywanego zagadnienia przedstawiono w podrozdziale 2 i 3 niniejszej publikacji.

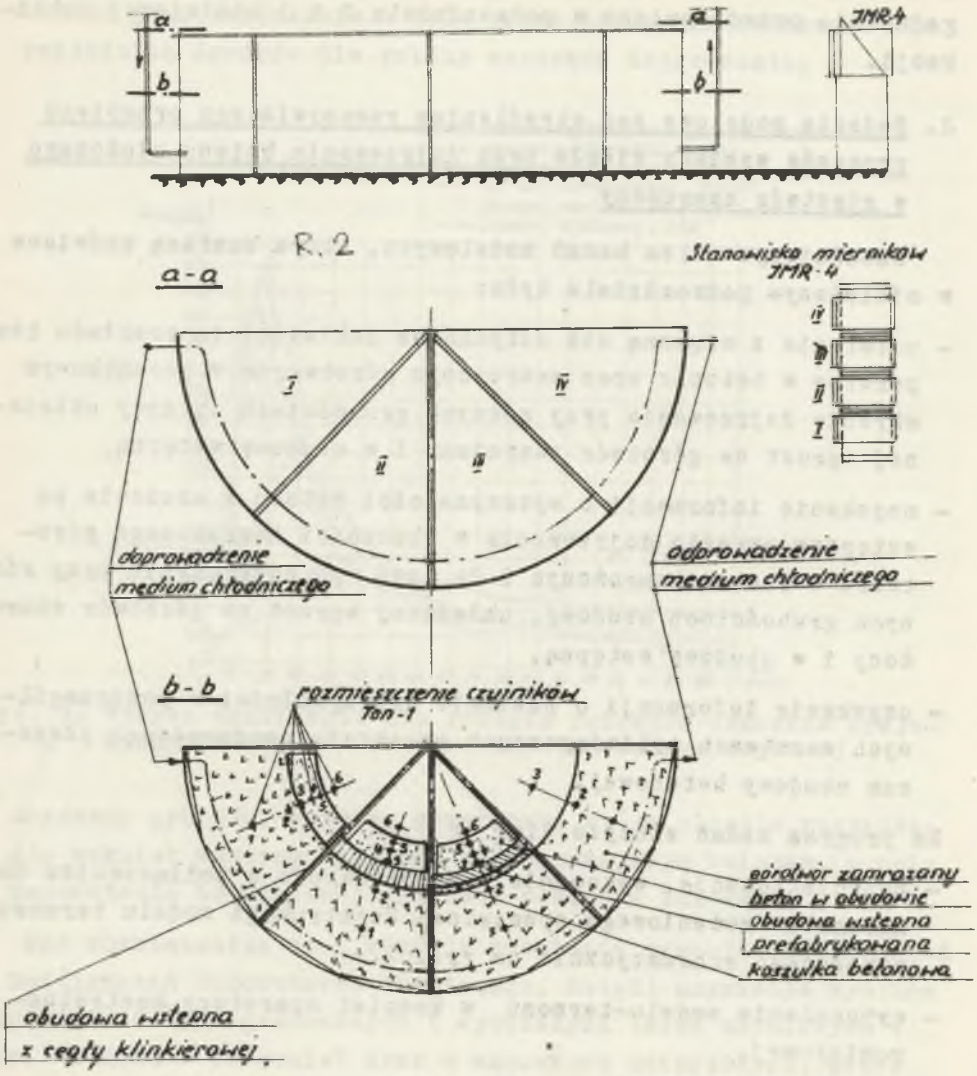
2. Badania modelowe nad określeniem rzeczywistego przebiegu procesów wymiany ciepła oraz dojrzewania betonu ułożonego w górotwór zamrożony

Zasadniczym celem badań modelowych, które zostaną omówione w niniejszym podrozdziale było:

- ustalenie z większą niż dotychczas dokładnością rozkładu temperatur w betonie oraz zamrożonym górotworze w początkowym okresie dojrzewania przy różnych grubościach obudowy układanej wprost na górotwór zamrożony i w obudowę wstępną,
- uzyskanie informacji o wytrzymałości betonu w obudowie po wstępnym okresie dojrzewania w obecności zamrożonego górotworu w stanie zamrożonym i 24 godz. po rozmrożeniu przy różnych grubościach obudowy, układanej wprost na górotwór zamrożony i w obudowę wstępną,
- uzyskanie informacji o poziomie wytrzymałości w poszczególnych warstwach cylindrycznych przekroju poprzecznego płaszcza obudowy betonowej.

Na program badań złożyło się:

- zaprojektowanie, wykonanie i zamontowanie z podłączeniem do agregatu mrożeniowego specjalnej konstrukcji modelu termosu pokazanego schematycznie na rys. 2.
- wyposażenie modelu-termosu w komplet aparatury kontrolno-pomiarowej,
- zamodelowanie górotworu zamrożonego,
- przeprowadzenie ćwiczebnych badań związanych z określeniem rozkładu temperatur w charakterystycznych punktach zamodelowanego górotworu,
- przeprowadzenie serii badań szkoleniowych w zakresie układania betonu, pomiaru rozkładu temperatur w charakterystycznych punktach betonu i górotworu oraz określania wytrzyma-



Rys. 2. Schemat agregatu badawczego tzw. "model-termos"

łości betonu dojrzewającego w sąsiedztwie górotworu zamrożonego,

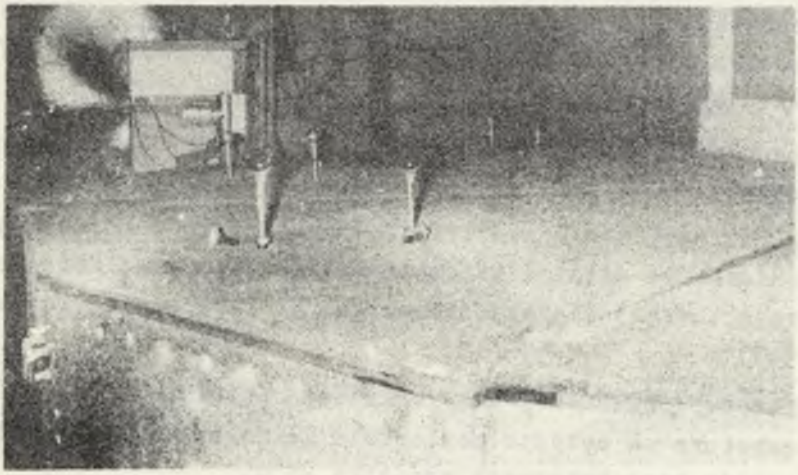
- przeprowadzenie pierwszej serii badań właściwych z betonem układanym wprost na górotwór zamrożony,
- przeprowadzenie drugiej serii badań właściwych z betonem układanym w obudowę wstępną z cegły klinkierowej i prefabrykatu siatkobetonowego.

W pierwszej i drugiej serii badań przyjęto następujące założenia:

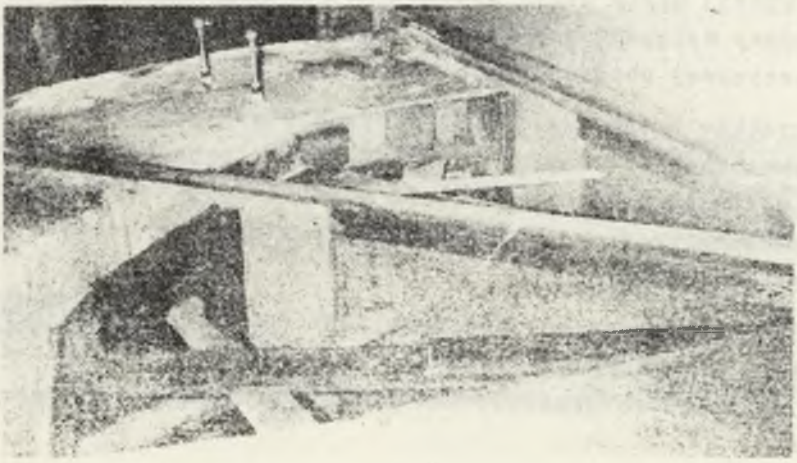
- masę betonową dla wszystkich badań wykonano w tej samej betoniarce ze ścisłym przestrzeganiem założonej receptury zaprojektowanej dla wykonywania obudowy betonowej szybu marki "400",
- temperaturę układanej masy betonowej ustalono na + 15°C,
- temperatura na ociosie pomierzona każdorazowo w momencie układania masy betonowej wynosiła -5°C,
- jako materiały do wykonania ścianki izolacyjnej (obudowy wstępnej) użyto cegły klinkierowej klasy "350" używanej do obudowy wstępnej szybów oraz elementy prefabrykowane siatkobetonowej obudowy wstępnej,
- wszystkie badania związane z określeniem rozkładu temperatur w betonie i zamrożonym górotworze, prowadzono od momentu ułożenia betonu w górotwór bądź obudowę wstępną do czasu uzyskania przez wszystkie punkty pomiarowe w betonie temperatury -2°C,
- badania wytrzymałościowe przeprowadzono na ciałach próbnych w stanie zamrożonym (natychmiast po wyjęciu z modelu-termosu) oraz po rozmrożeniu (24 godz. po wyjęciu z modelu-termosu).

W odróżnieniu do wszystkich dotychczasowych badań z tego zakresu [1] [2] [3] w przedmiotowych zastosowano odmienną metodykę.

Warunki naturalne zamodelowano w ten sposób, że w modeltermos wykonany w postaci wycinka szybu (rys. 3) z podwójnych płyt paździerzowych zaizolowanych dodatkowo styropianem nało-



Rys. 3. Widok ogólny modelu termosu

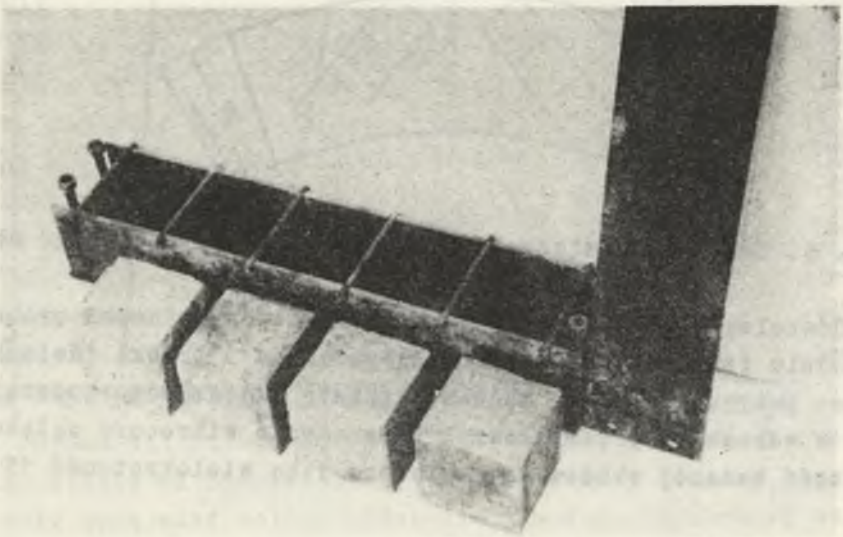


Rys. 4. Fragment modelu termosu z zamodelowanym górotworem

żono piasku kurzawkowego zawodnionego wodą kopalnianą. Połowę szybu (rys. 2) podzielono na cztery jednakowe segmenty, w które zamontowano odpowiednie wężownice z rur mrożeniowych (imi-

tujące pionowe rury mrożeniowe) które następnie podłączono w obieg chłodniczy agregatu mrożeniowego. Zamodelowany górotwór pokazano na rys. 4. Każdy z segmentów (I-IV) wyposażono w komplet aparatury do pomiaru temperatur. Na komplet ten składa się sześciomiejscowy ilorazowy miernik wskazująco-rejestrujący typu IMR-4 produkcji Krakowskiej Fabryki Aparatów Pomiarowych (z 1965 r.). Miernik ten w połączeniu z 6 czujnikami termometrycznymi oporowymi typu Ton-1 produkcji tejże fabryki o zakresie mierniczym od -50÷ ± 150°C, służy do zdalnego pomiaru i zapisu temperatur. Dokładność pomiaru wynosi ± 1°C. Wyniki z zapisanych taśm odczytuje się przy użyciu czytnika i nanosi w odpowiedniej skali na wykresy. Sposób rozmieszczenia czujników (miejsca pomiaru temperatur dla każdego z badanych układów) pokazano na rys. 2 oraz przy poszczególnych wykresach.

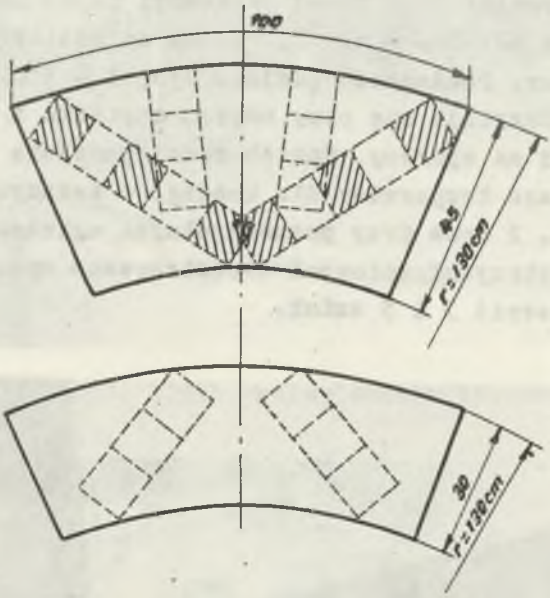
Do badań wytrzymałościowych skonstruowano specjalne foremki (rys. 5) dla serii 3 i 5 sztuk.



Rys. 5. Forma bateryjna oraz próbki betonowe do badań wytrzymałościowych

Były to kostki o wymiarach 10x10x10 cm. Foremki w trakcie badań umieszczono wg schematów rys. 6 w środku obudowy i wraz z układaną masą zawibrowano. Oddzielenie betonu oraz wydobycie

próbek z foremki po rozebraniu obudowy zapewnia odpowiednie smarowanie jej powierzchni specjalnymi emulsjami z olejów przepalonych. Rozmieszczenie radialne foremek w obudowie gwarantuje uzyskanie pełnego obrazu rozkładu wytrzymałości betonu w poszczególnych warstwach obudowy.
Badania wytrzymałościowe przeprowadzono na prasie o docisku 150 T.

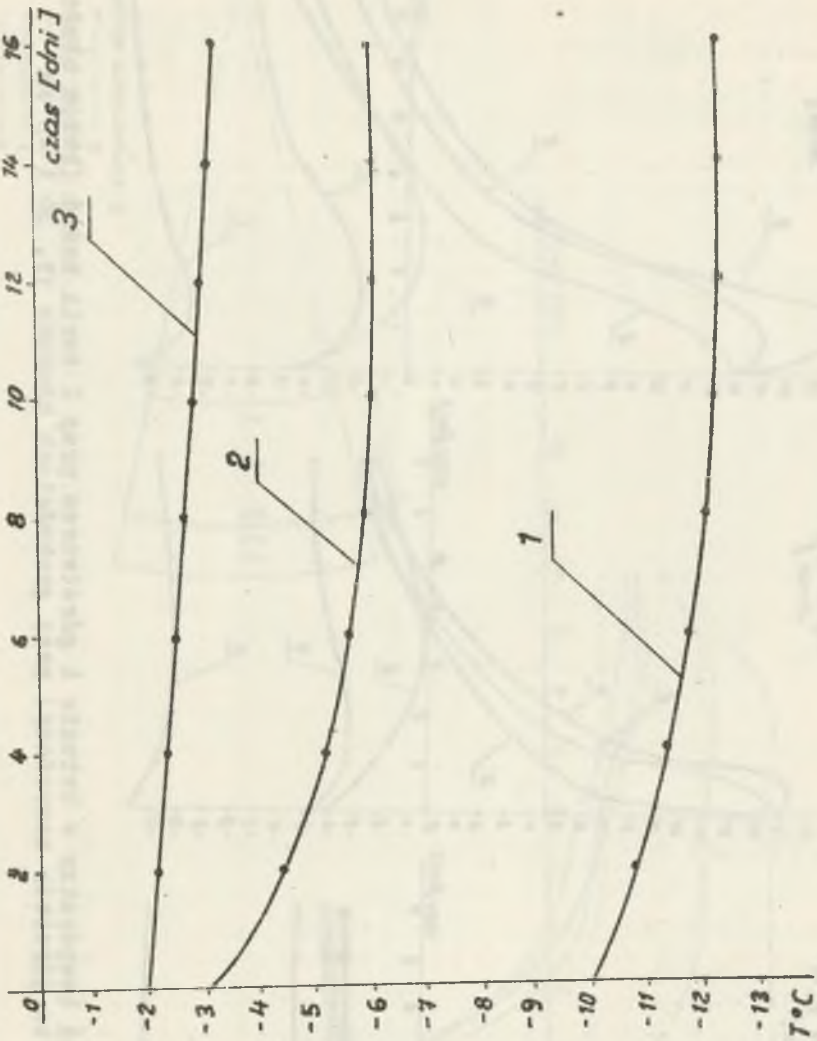


Rys. 6. Schemat rozmieszczenia próbek w badanym wycinku obudowy

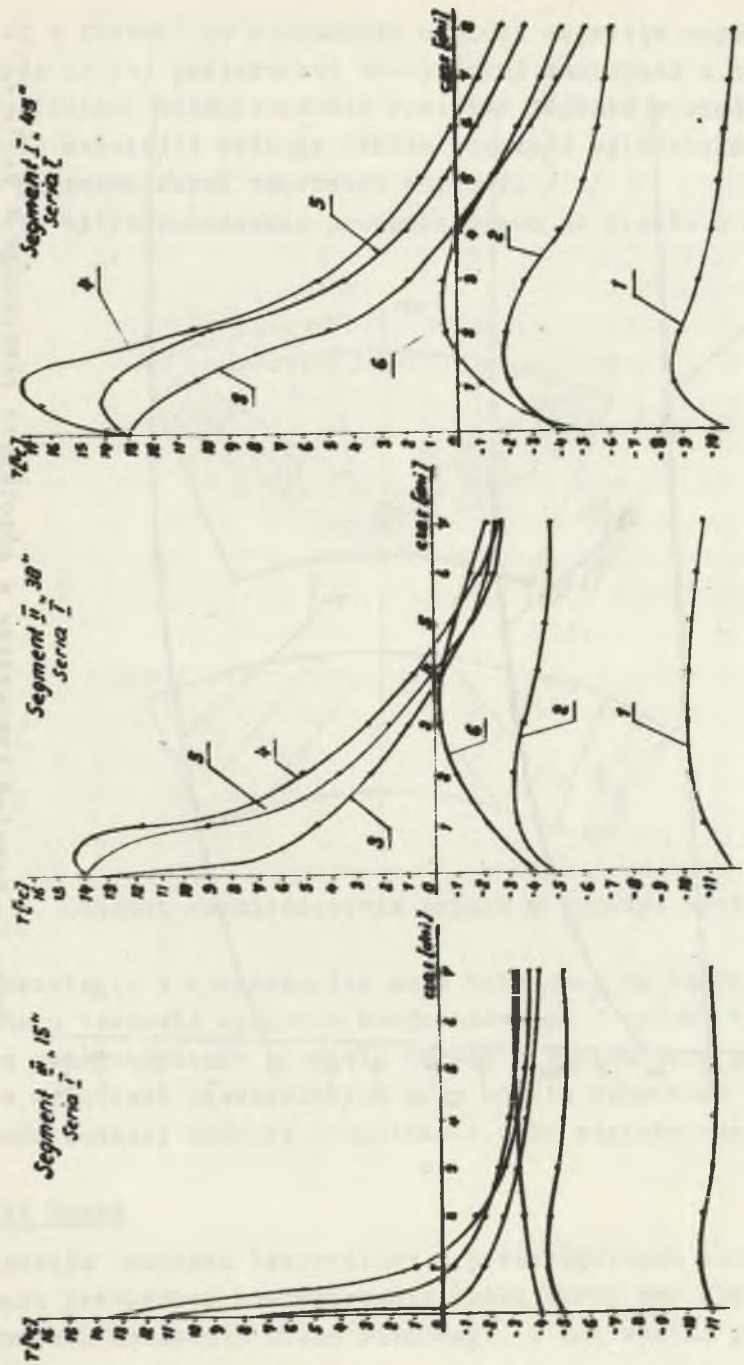
Równolegle z wykonywaniem masy betonowej do badań próbnych w modelu termosie wykonano każdorazowo po 3 próbki "świadki". Beton przy układaniu w modelu termosie zagęszczono podobnie jak w warunkach przemysłowych przy użyciu wibratora wgłębnego. Grubość badanej obudowy stopniowano jako wielokrotność 15 cm.

Wyniki badań

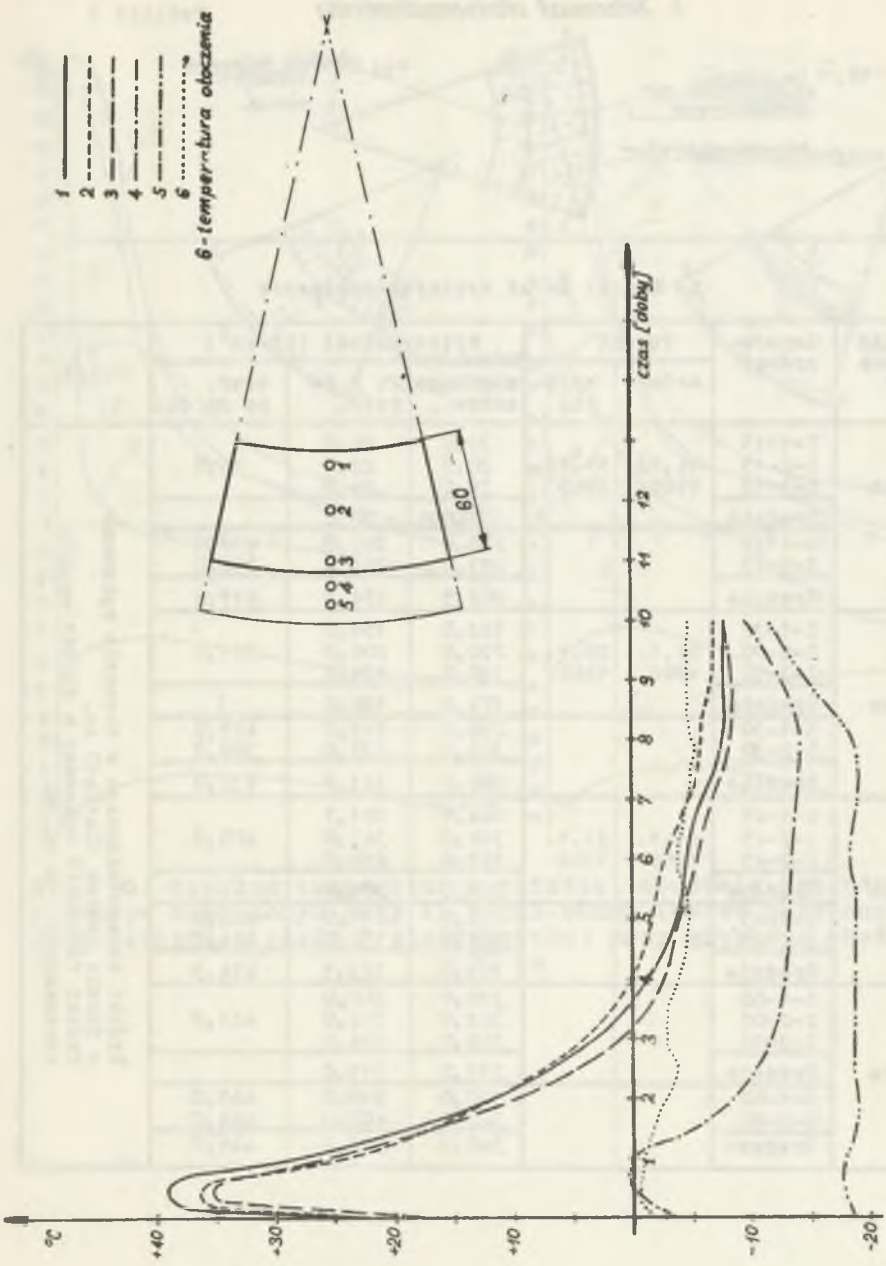
Badania rozkładu temperatury w poszczególnych punktach górotworu prowadzono nieprzerwanie przez okres dwu tygodni tj. do momentu ustalenia stanu równowagi, a ich wyniki przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Rozkład temperatur w górotworze zamrożonym w p. 1, 2 i 3

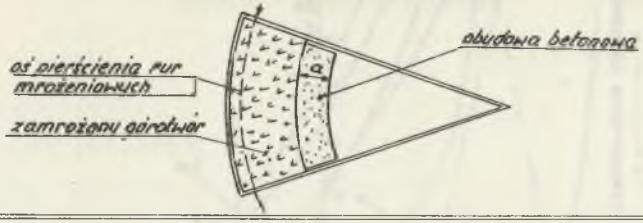


Rys. 8. Rozkład temperatur w betonie i górotworze przy I serii badań (beton ułożony wprost na górotwór samrożony) przy grubościach obudowy 15, 30 i 45 cm



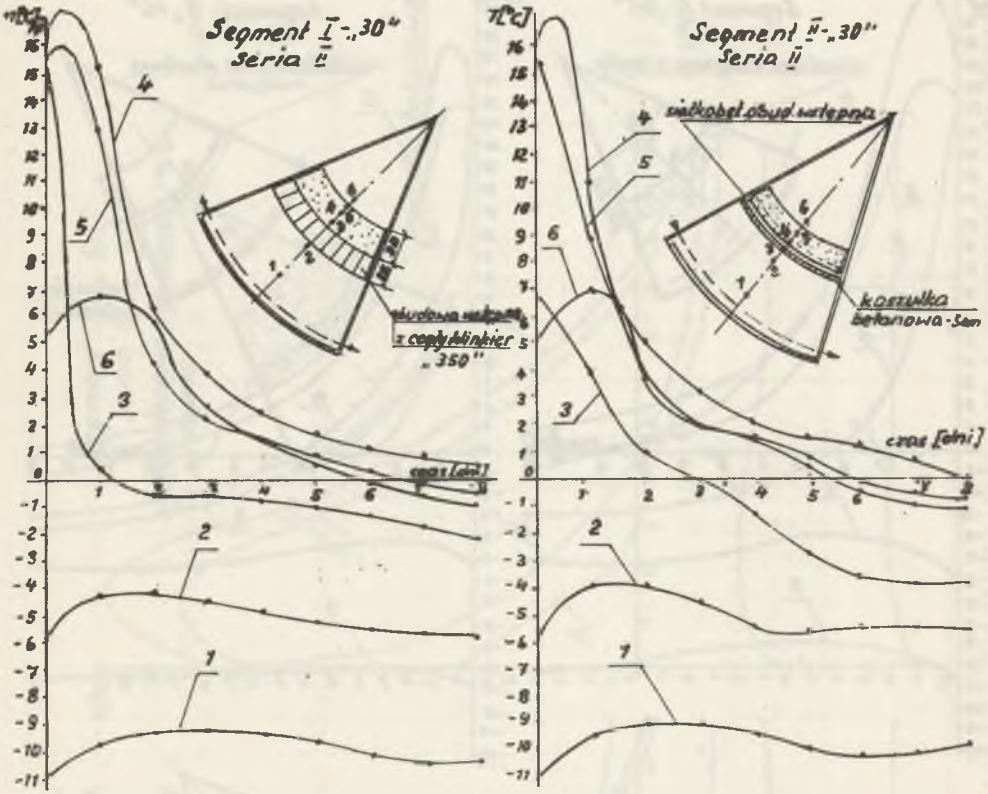
Rys. 9. Rozkład temperatur w betonie i górotworze przy I serii badań (beton ułożony wprost na górotwór zamrożony) przy grubości 60 cm

A *Schemat doświadczenia* Tablica 1

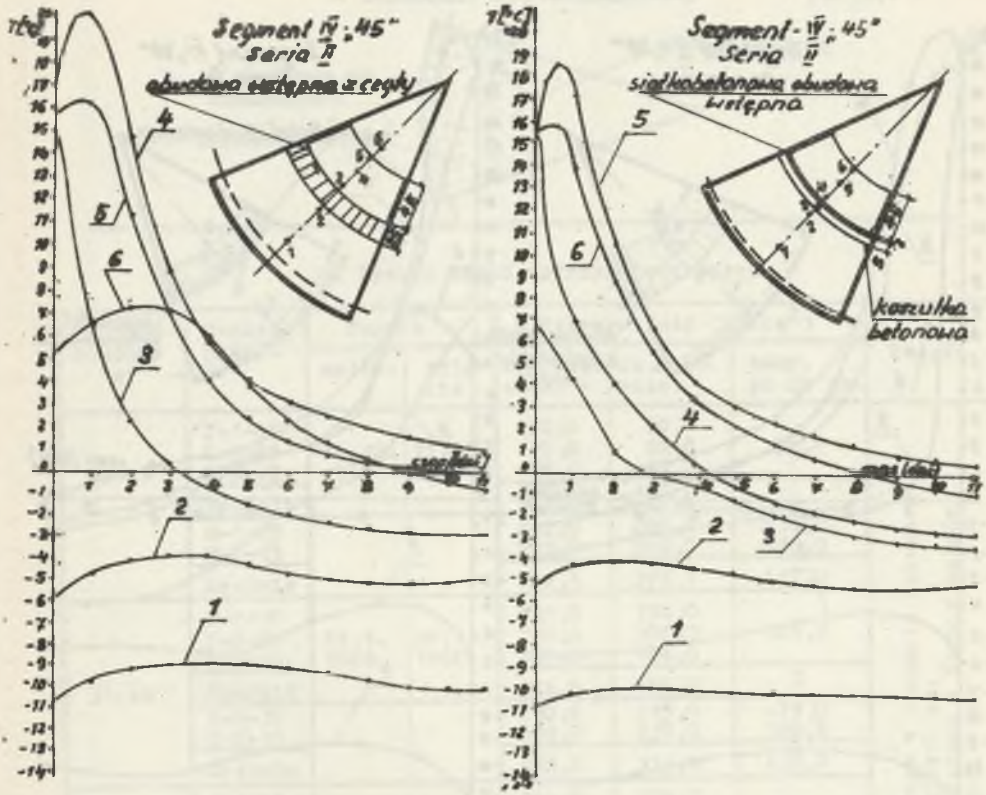


B. Wyniki badań wytrzymałościowych

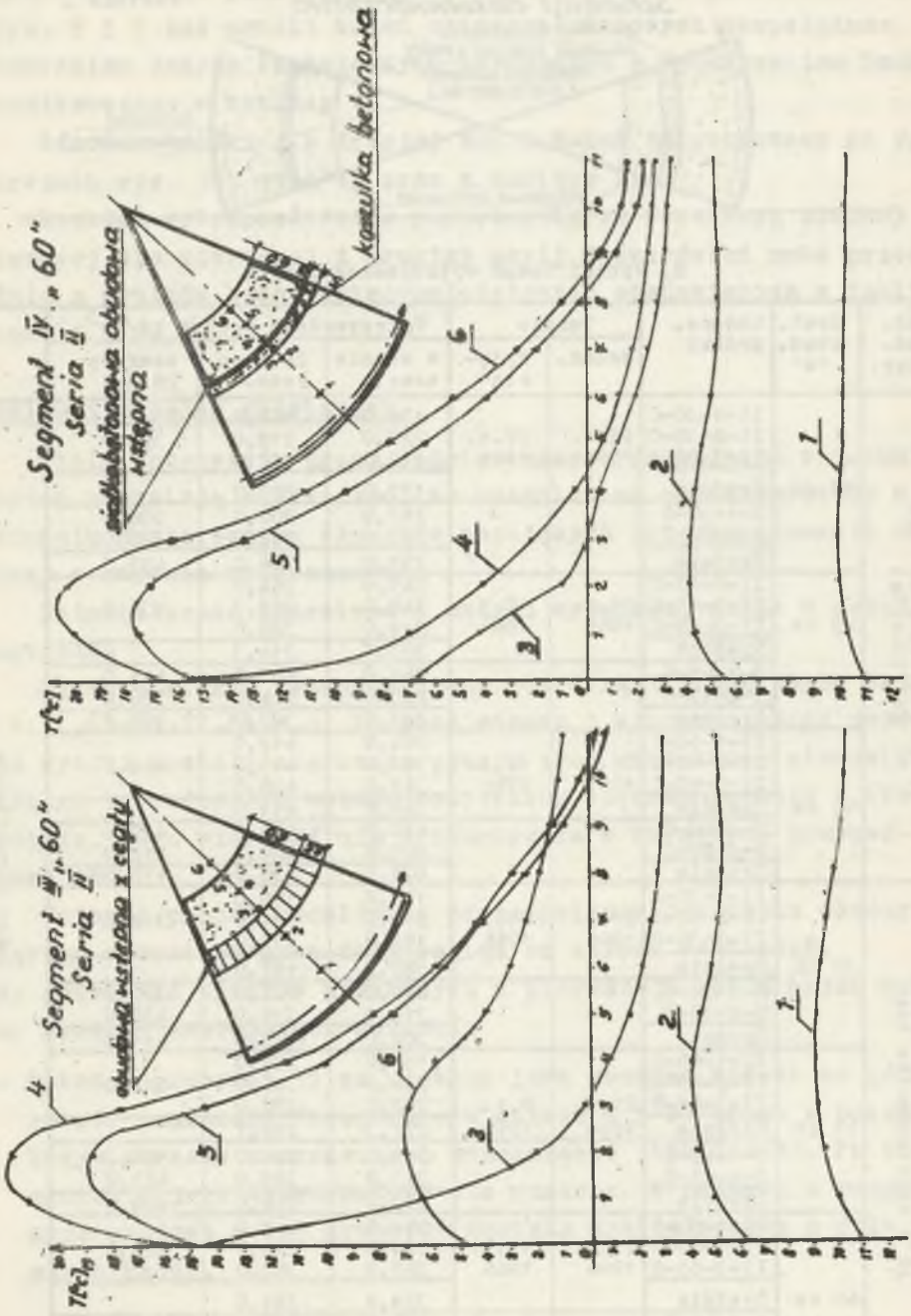
Grubość obudowy "a"	Oznacz. próbki	Termin		Wytrzymałość (kG/cm^2)			Uwagi
		założ.	wyjęcia	w stanie zamr.	24 h po rozm.	zamr. po 28 dn.	
15 cm	I-1-15	14.12. 1965	17.12. 1965	32,0	20,0	56,0	Próbki betonu badanego w termosie wykonano w formie kostek 10x10x10 cm. Próbki "świadki" wykonano w formie wałów normowanych Φ 16 cm.
	I-2-15			20,0	22,0		
	I-3-15			28,0	24,0		
	Średnia			27,0	22,0		
	S-1-15			242,0	280,0	436,0	
	S-2-15			283,0	269,0	398,0	
	Średnia			262,5	274,5	417,0	
30 cm	I-1-30	21.1. 1966	28.1. 1966	122,0	158,0	301,0	
	I-2-30			220,0	206,0		
	I-3-30			180,0	194,0		
	Średnia			174,0	186,0		
	S-1-30			290,0	215,0	475,0	
	S-2-30			302,0	237,0	389,0	
	Średnia			280,0	321,5	432,0	
45 cm	I-1-45	21.1. 1966	31.1. 1966	264,0	301,7	400,0	
	I-2-45			366,0	343,0		
	I-3-45			165,0	210,0		
	Średnia			265,0	284,9		
	S-1-45			320,0	317,0	485,0	
	S-2-45			306,0	330,0	424,0	
	Średnia			313,0	323,5	454,5	
60 cm	I-1-60			310,0	340,0	421,0	
	I-2-60			302,0	312,0		
	I-3-60			266,0	294,0		
	Średnia			293,0	315,0		
	S-1-60			320,0	318,0	465,0	
	S-2-60			360,0	402,0	424,0	
	Średnia			340,0	360,0	445,0	



Rys. 10. Rozkład temperatur w betonie, obudowie wstępnej i górotworze zamrożonym przy II serii badań (beton układany w obudowę wstępną z cegły i siatkobetonu) przy grubości obudowy 30 cm

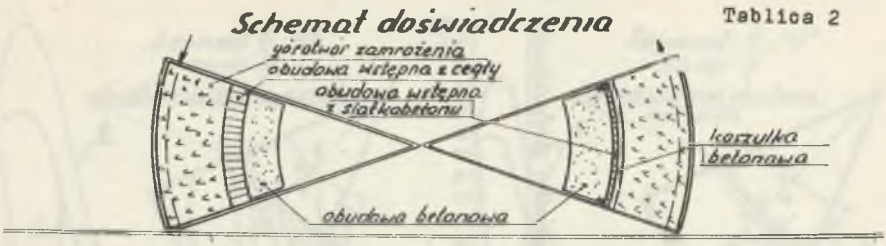


Rys. 11. Rozkład temperatur w betonie, obudowie wstępnej i górotworze zamrożonym przy drugiej serii badań (beton układany w obudowę wstępną z cegły i siatkobetonu) przy grubości obudowy 45 cm



Rys. 12. Rozkład temperatur w betonie, obudowie wstępnej i górotworze zamrożonym przy drugiej serii badań (beton układany w obudowę wstępną z cegły i siatkobetonu), przy grubości obudowy 60 cm

Tablica 2



B. Wyniki badań wytrzymałościowych

Rodz. obud. wstęp.	Grub. obud. "a"	Oznacz. próbki	Termin założ.	Termin wyjęcia	Wytrzymałość próbek kG/cm² w stanie zamr.	24 h po rozm.	zamr. po 28 dn.	
Cegła klinkierowa "350" gr (1-cegła)	30 cm	II-1-30-C	21.1. 1966	27.1. 1966	152,0	164,0	328,0	Jak w tablicy 1
		II-2-30-C			220,0	218,0		
		II-3-30-C			213,0	210,0		
		Średnia			195,0	207,0		
		S-1-30-C			249,0	300,0	396,0	
		S-2-30-C			333,0	312,0	475,0	
		Średnia			291,0	306,0	435,5	
	45 cm	II-1-45-C	21,2. 1966	10.3. 1966	249,0	264,0	436,8	
		II-2-45-C			348,0	359,0		
		II-3-45-C			314,0	320,0		
		Średnia			303,7	314,3		
		S-1-45-C			362,0	402,0	444,0	
		S-2-45-C			280,0	364,0	396,0	
		Średnia			321,0	383,0	420,0	
	60 cm	II-1-60-C	21.2. 1966	18.3. 1966	364,0	412,0	444,0	
		II-2-60-C			382,0	405,0		
		II-3-60-C			349,0	426,0		
		Średnia			365,0	411,0		
		S-1-60-C			410,0	436,0	422,0	
		S-2-60-C			402,0	424,0	415,0	
		Średnia			406,0	430,0	419,0	
Prefabrykat siatkobeton gr 3 cm + koszulka bet.	30 cm	II-1-30-S	21.3. 1966	28.3 1966	170,0	169,0	312,0	
		II-2-30-S			194,0	224,0		
		II-3-30-S			182,0	198,0		
		Średnia			185,3	197,0		
		S-1-30-S			296,0	302,0	384,0	
		S-2-30-S			312,0	316,0	439,0	
		Średnia			304,0	309,0	411,5	
	45 cm	II-1-45-S	21,3. 1966	8.4. 1966	184,0	224,0	412,0	
		II-2-45-S			346,0	340,0		
		II-3-45-S			302,0	296,0		
		Średnia			277,3	286,7		
		S-1-45-S			364,0	291,0	384,0	
		S-2-45-S			341,0	349,0	429,0	
		Średnia			353,0	320,0	406,5	
	60 cm	II-1-60-S	21.3. 1966	15.4. 1966	344,0	412,0	420,0	
		II-2-60-S			322,0	390,0		
		II-3-60-S			305,0	380,0		
		Średnia			324,0	394,0		
		S-1-60-S			344,0	350,0	425,0	
		S-2-60-S			324,0	333,0	410,0	
		Średnia			334,0	342,0	417,0	

Wyniki pomiaru rozkładu temperatur w betonie i górotworze zamrożonym dla pierwszej serii badań pokazano graficznie na rys. 8 i 9 zaś wyniki badań wytrzymałościowych uzupełnione szeregiem danych technicznych związanych z wykonywaniem badań zamieszczono w tablicy 1.

Odnośne wyniki dla drugiej serii badań zilustrowano na wykresach rys. 10, 11 i 12 oraz w tablicy 2.

Rozkład wytrzymałości w poszczególnych warstwach obudowy betonowej dla pierwszej i drugiej serii doświadczeń może prześledzić z wyników badań wytrzymałościowych zestawionych w tablicach 1 i 2.

Wnioski z badań modelowych

Stałe obserwacje pracy modelu-termosu prowadzone w trakcie badań pozwalają stwierdzić, że pozwolił on na odtworzenie w stopniu dostatecznym warunków panujących przy betonowaniu obudowy w szybach mrożeniowych.

Zainstalowana aparatura z małymi wyjątkami zdała w pełni egzamin.

Okres w którym przeprowadzono pierwszą i drugą serię badań (1.XI.65-15.VI.66 r.) to pora zimowa i wiosenna, stąd uzyskane wyniki zostały obarczone pewnym choć stosunkowo niewielkim błędem spowodowanym zmianą temperatur wnętrza termosu i otoczenia. Jego wielkość nie przekroczyła w skrajnych przypadkach 5%.

Badania próbne umożliwiły przeszkolenie personelu obsługującego aparaturę oraz dały pogląd na całość zamierzeń.
Na podstawie wyników uzyskanych w pierwszej serii badań możemy wysunąć następujące wnioski:

- Beton o grubości 15 cm ułożony jako obudowa wprost na górotwór zamrożony (temperatura ociosu - 5°C) ulega w początkowym okresie zamrożeniu i zniszczeniu (tablica 1). Po odmrożeniu jego wytrzymałość nie wzrasta. W związku z powyższym obudowa o tej grubości została wyeliminowana z dalszych badań.

- Zwiększenie grubości badanej obudowy wydatnie poprawie warunki dojrzewania betonu co można zaobserwować na rys. 10 i tablicy 1.

W trakcie prowadzenia drugiej serii doświadczeń zaobserwowano następujące prawidłowości:

- zgodnie z przewidywaniami wprowadzenie pomiędzy zamrożony górotwór i obudowę betonową ścianki izolacyjnej w postaci obudowy wstępnej znacznie poprawia warunki dojrzewania betonu. Z uwagi na reprezentowane własności izolacyjne (λ) cegła klinkierowa w porównaniu z siatkobetonem jako obudowa wstępna gwarantuje uzyskanie lepszych wyników wytrzymałościowych,
- charakter przebiegu krzywych rozkładu temperatur jest zbliżony, zmienia się jedynie ich stromizna.

Wyniki I serii badań wytrzymałościowych obudowy zwłaszcza przy większej grubości zamodelowanej obudowy wykazały wyraźnie zróżnicowanie jej wysokości. Wbrew dotychczasowym przypuszczeniom najwyższą wytrzymałość uzyskuje warstwa betonu od strony zamrożonego górotworu - najniższą zaś warstwa środkowa. Przy zastosowaniu zamodelowanej obudowy wstępnej wytrzymałość znacznie bardziej wyrównuje się.

Dodatkowy sprawdzian zaobserwowanych prawidłowości mają stanowić badania w warunkach naturalnych tj. w szybach głębionych metodą mrożeniową, które to zostaną omówione w następnym podrozdziale.

3. Badania w warunkach naturalnych nad określeniem rzeczywistego przebiegu procesów wymiany ciepła oraz dojrzewania betonu ułożonego w górotwór zamrożony [4], [5]

Dla dokładniejszego zbadania zjawisk zachodzących w betonie w czasie jego dojrzewania przy zetknięciu z zamrożonym górotworem służył w pierwszej fazie tzw. model termos. Uzyskane tą drogą wyniki oraz podstawowe wnioski zostały zamieszczone w podrozdziale 2.

Jakkolwiek celowość tych badań była bezsporna to biorąc pod uwagę niewielką masę badanego betonu w modelu-termosie w porów-

naniu z dużą masą z jaką mamy do czynienia w szybie rzeczywistym, uzyskanych wyników nie można było uznać za w pełni miarodajne. Dlatego też nie poprzestano wyłącznie na badaniach modelowych lecz przeniesiono je również bezpośrednio do szybów.

Celem badań, które przeprowadzono w warunkach in situ było:

- uzyskanie sprawdzianu dla wyników związanych z rozkładem temperatur w charakterystycznych punktach betonu i górotworze w początkowym okresie dojrzewania,
- dodatkowe sprawdzenie zauważonego uprzednio rozkładu wytrzymałości betonu w poszczególnych warstwach cylindrycznych obudowy,
- ustalenie warunków dojrzewania dla betonu z poszczególnych warstw cylindrycznych obudowy.

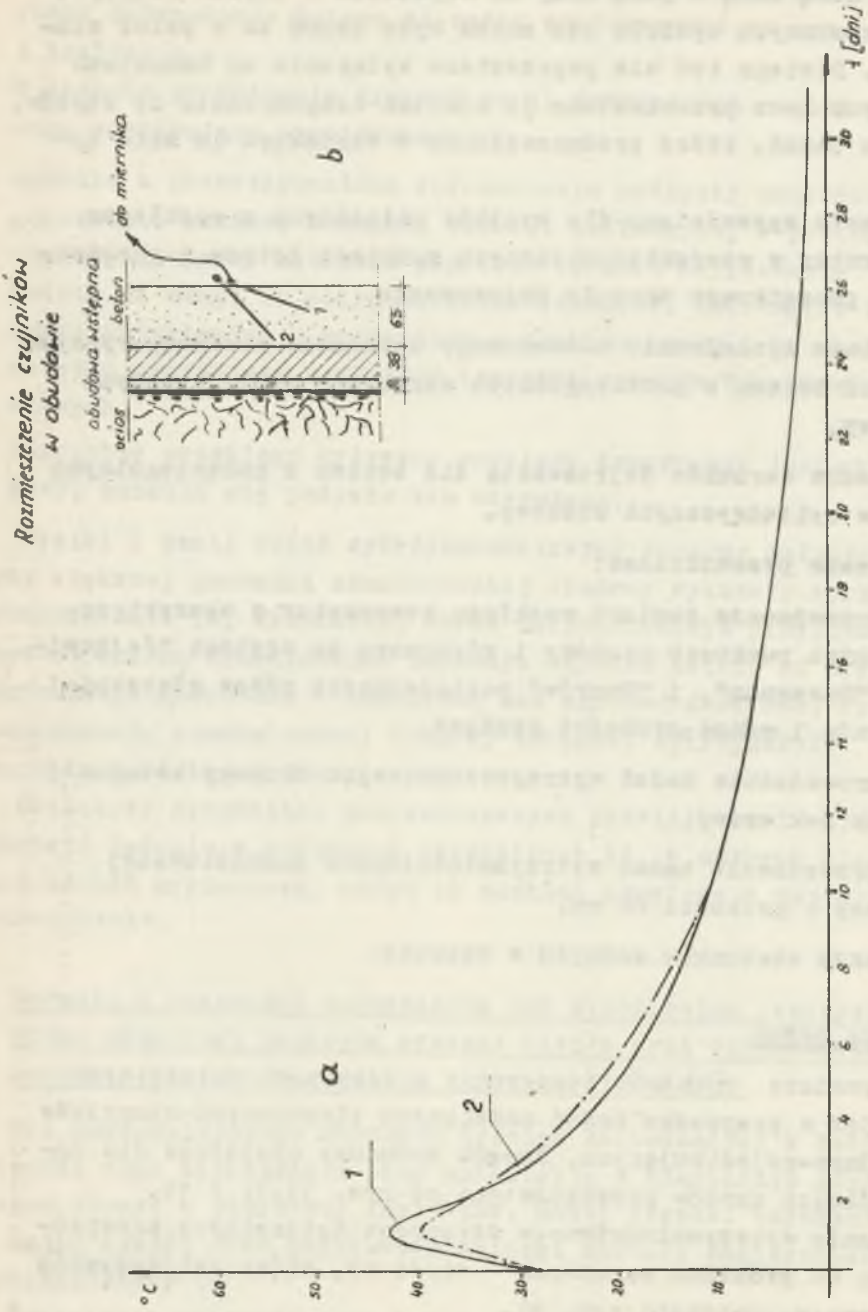
W programie przewidziano:

- przeprowadzenie pomiaru rozkładu temperatur w charakterystycznych punktach obudowy i górotworu na szybach "Jejkowice", "Szczepan", i "Knurów" posiadających różne głębokości mrożenia i różne grubości obudowy,
- przeprowadzenie badań wytrzymałościowych obudowy betonowej szybów jak wyżej,
- przeprowadzenie badań wytrzymałościowych zamodelowanej obudowy o grubości 60 cm,
- zbadanie stosunków wodnych w betonie.

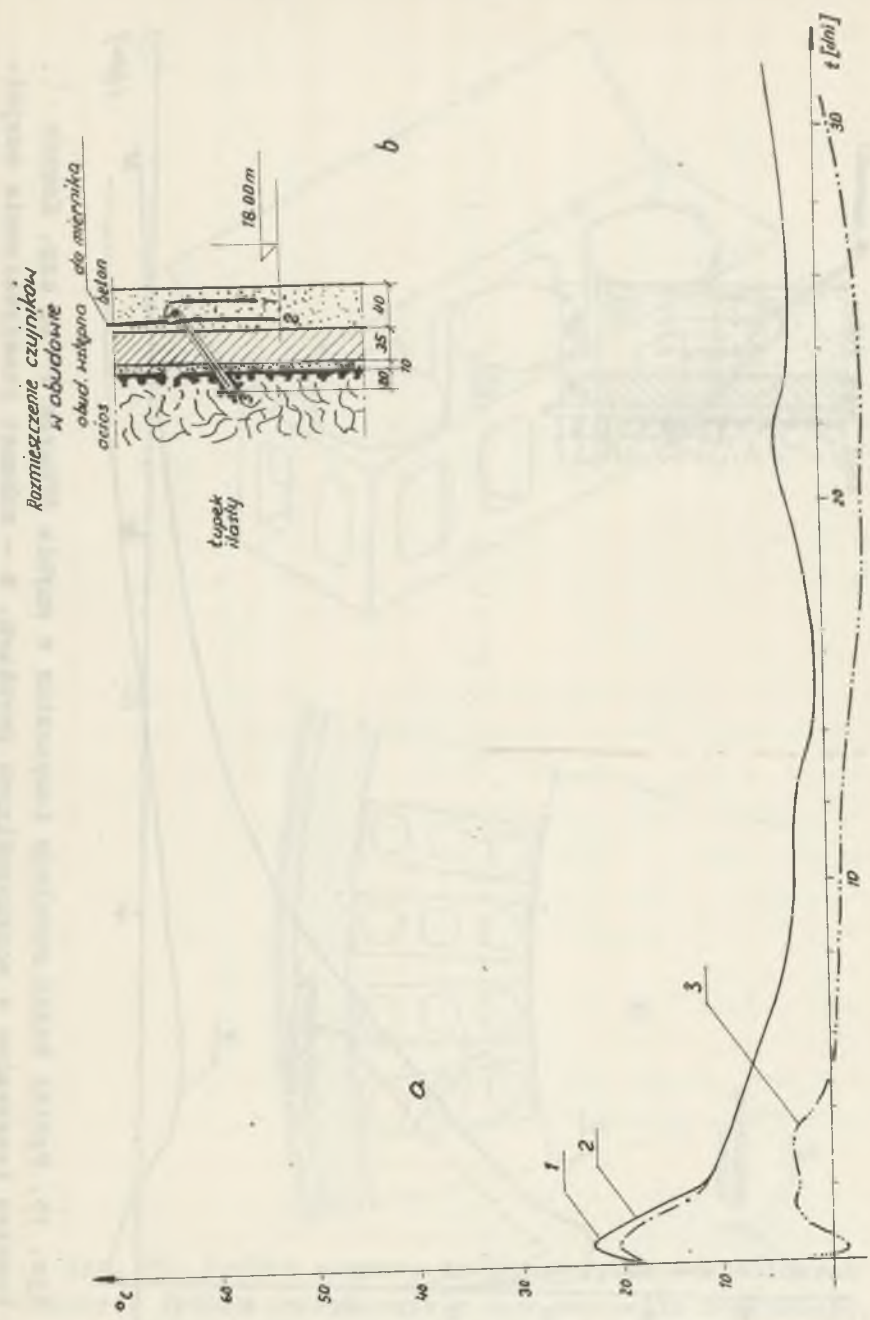
Metodyka badań

Do pomiaru rozkładu temperatur w warunkach naturalnych użyto jak w przypadku badań modelowych ilorazowych mierników wskazująco-rejestrujących. Sposób zabudowy czujników dla poszczególnych szybów przedstawiono na rys. 13,14 i 15.

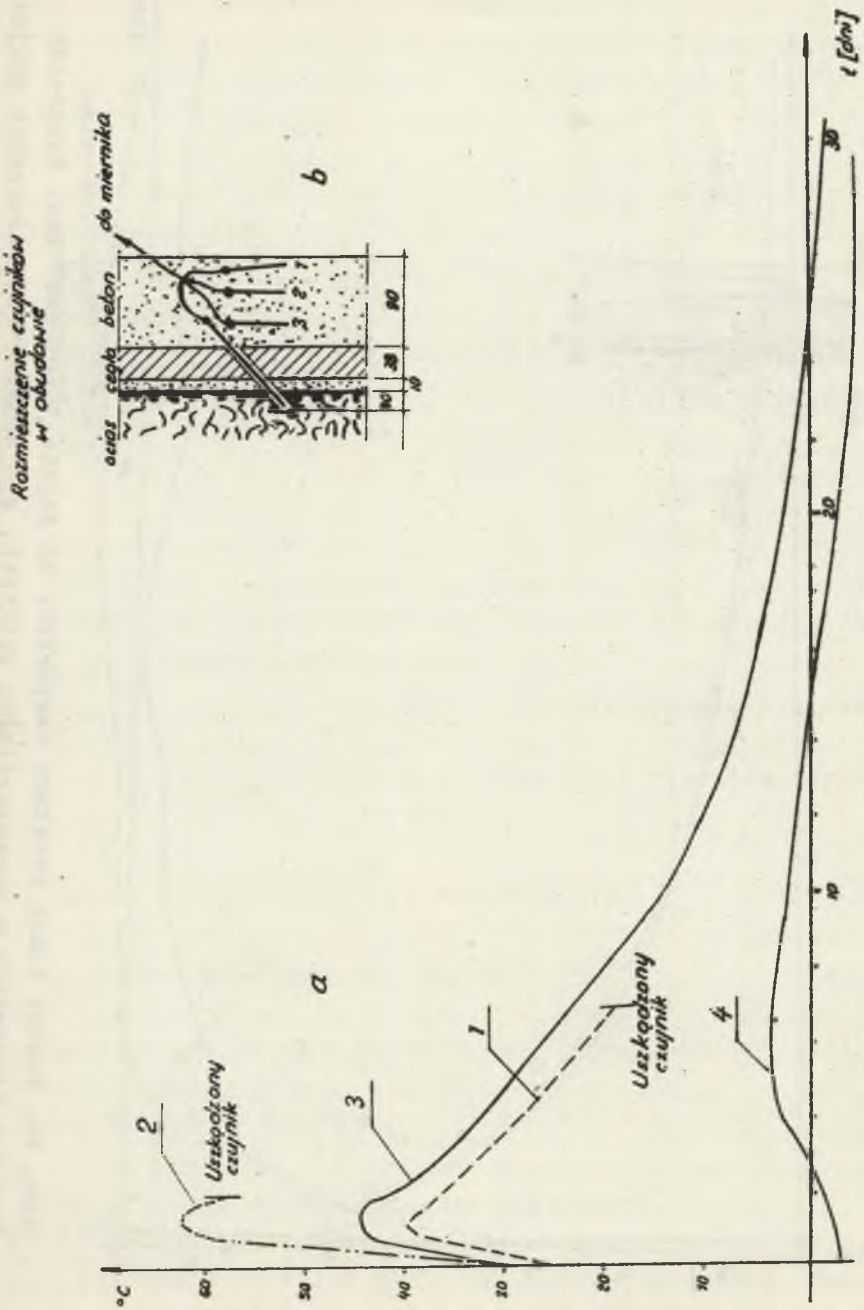
Badania wytrzymałościowe w warunkach naturalnych przeprowadzono na próbkach normowych 16/16 cm, które zabudowywano w obudowę wg schematu rys. 16.



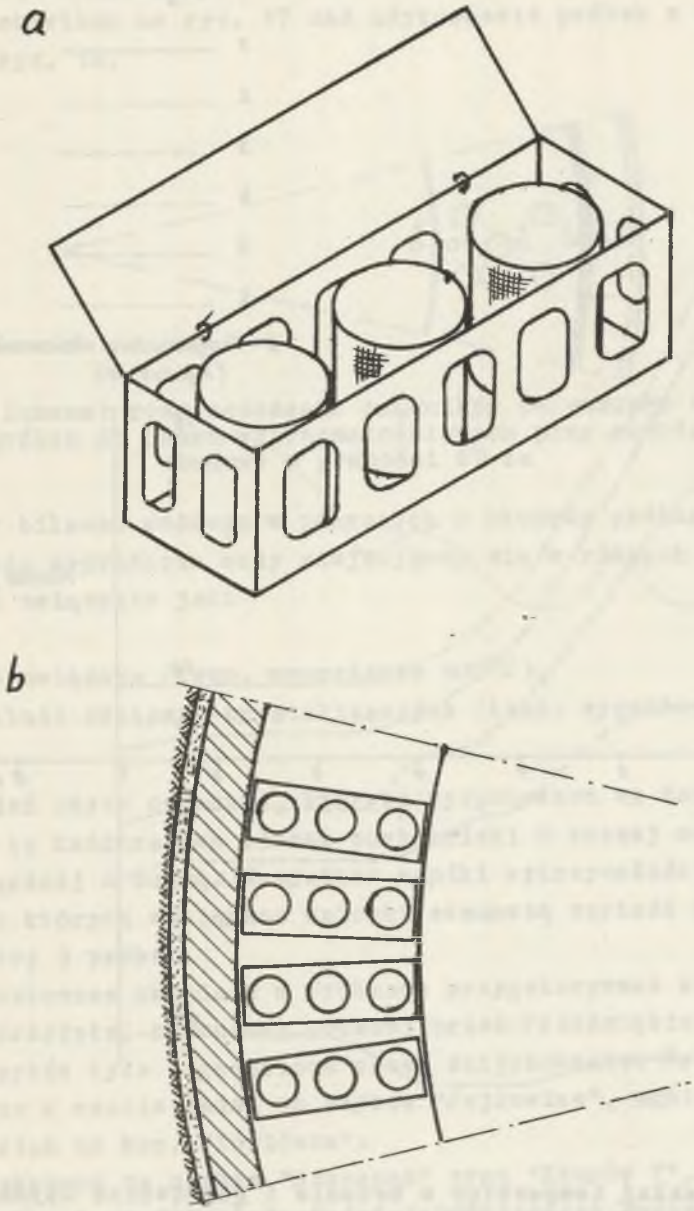
Rys. 13. Wyniki badań rozkładu temperatur na szybie "Jejkowice" kop. Ignacy
a – rozkład temperatur w poszczególnych punktach, b – schemat rozmieszczenia czujników w obudowie



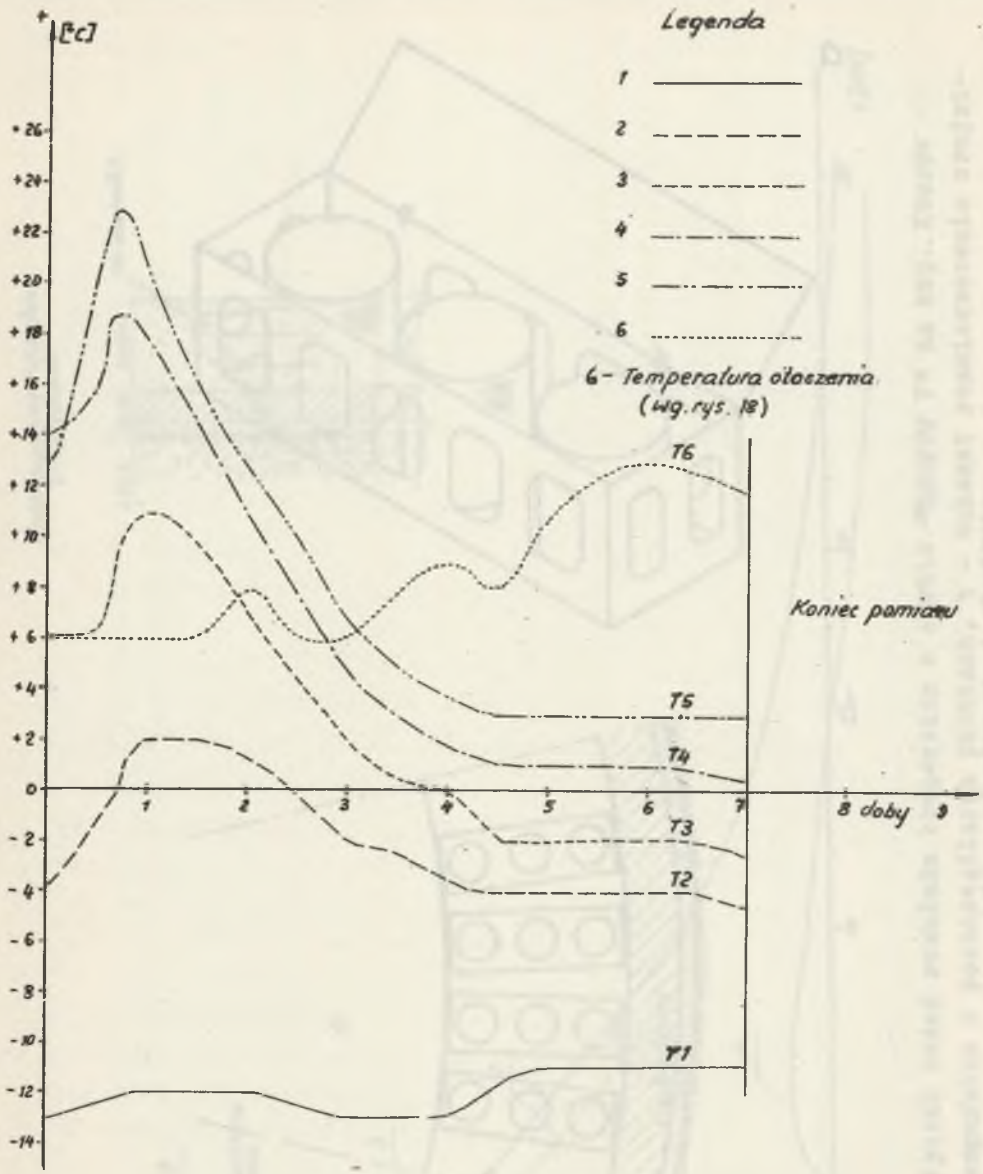
Rys. 14. Wyniki badań rozkładu temperatur na szybie "Szczepan" kop. Sosnowiec
a – rozkład temperatur w poszczególnych punktach, b – schemat rozmieszczenia czujników w obudowie i górotworze



Rys. 15. Wyniki badań rozkładu temperatur w szybie "Kourów V" na kop. Kourów - a - rozkład temperatur w poszczególnych punktach, b - schemat rozmieszczenia czujników w górotworze i obudowie

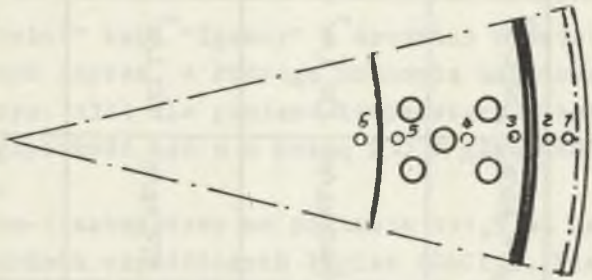


Rys. 16. Próbki normowe do badań wytrzymałościowych
a - bateria próbek umieszczona w pomieszczeniu tekturowym, b - schemat rozmieszczenia próbek w obudowie



Rys. 17. Rozkład temperatur w betonie i górotworze uzyskany przy zamodelowaniu obudowy o grubości 60 cm

Rozmieszczenie czujników w betonie i górotworze zamodelowanym przedstawiono na rys. 17 zaś usytuowanie próbek w betonie obrazuje rys. 18.



Rys. 18. Schemat rozmieszczenia czujników do pomiaru temperatury oraz próbek do badań wytrzymałościowych przy zamodelowaniu obudowy o grubości 60 cm

Pomiar bilansu wodnego w pobranych z obudowy próbkach wykonano metodą wyprażania wody znajdującej się w różnych fazach i stopniu związania jak:

- wilgoć
- woda półzwiązana (temp. wyprażania 400°C),
- woda silnie związana-krystalizacyjna (temp. wyprażania około 600°C).

Do badań użyto cementów, którymi dysponowano na danym szybie. Był to każdorazowo cement portlandzki o znanej charakterystyce, zgodnej z normą. Wszystkie wyniki wytrzymałościowe na podstawie których wyciągano wnioski stanowią wartość średnią co najmniej 3 próbek.

Masa betonowa układana w próbkach przygotowywana według ogólnie przyjętej receptury podanej przez Przedsiębiorstwo Budowy Szybów była zagęszczana przez sztychowanie. Próbki przygotowywane w czasie badań na szybie "Jejkowice", zgniatano w laboratorium na kop. "Zofiówka".
Próbki wykonane na szybie "Szczepan" oraz "Knurów V", zgniatano w laboratorium Zakładu Badań i Doświadczeń Budownictwa Górniczego. Prędkość przyrostu obciążenia dla próbek normowych ϕ 16/16 cm wynosiła 1-1,3 at/sek. dla Rw - 200 kG/cm^2, zaś 1,3-2 at/sek dla Rw 200 kG/cm^2.

Tablica 3

Składniki receptur betonu / Miejsce pobrania prób	Cement	Kruszywo			Piasek 0-2 mm	Woda	$CaCl_2$
		Grys 8-16 mm	Grys 16-25 mm	Żwir 3-15 mm			
Szyb "Jejkowice" kop. "Ignacy"	portlandzki marki "400" 450 kg/m^3	bazaltowy 705 kg/m^3	bazaltowy 713 kg/m^3	-	472 kg/m^3	180 l/m^3	
Szyb "Szczepan" kop. "Sosnowiec"	portlandzki marki "350" 360 kg/m^3	-	-	760 kg/m^3	1140 kg/m^3	230 l/m^3	14 kg/m^3
Szyb "Knurów V" kop. "Knurów"	portlandzki marki "400" 414 kg/m^3	705 kg/m^3	713 kg/m^3	-	472 kg/m^3	180 l/m^3	9 kg/m^3
Model-termos	drogowy marki "325" 450 kg/m^3	705 kg/m^3	713 kg/m^3	-	472 kg/m^3	220 l/m^3	-

Recepturę betonu dla każdego z szybów podano w tablicy 3. Pozostałe założenia jak w podrozdziale 2.

Wyniki badań

A. Szyb "Jejkowice" kop. "Ignacy" o średnicy w świetle 6 m był pierwszym szybem, w którego obudowie zabudowano dwa czujniki (rys. 13b) dla pomiaru temperatury w betonie. Planowana głębokość 418 m z czego 230 m głębiono metodą mrożeniową.
Czujniki Ton-1 zabudowano na poziomie 111,5 m, umieszczając je w rurkach wypełnionych ługiem ($CaCl_2$). Dla sprawdzenia prawidłowości wskazań czujników, termometrów oporowych dokonywano okresowych kontroli przy użyciu termometrów rtęciowych. Wyniki badań były każdorazowo zgodne. Przebieg (rozkład) temperatur w czasie dojrzewania betonu obudowy szybowej przedstawiono graficznie na rys. 13a. Dla uzyskania informacji odnośnie wytrzymałości w badanym odcinku obudowy betonowej zabudowano poza odeskowaniem poziomo 3 serie forsnek (rys. 16) tak, że w czasie betonowania swobodnie wypełniły się betonem. Próbki wydobyte po 15 dniach poddano zgniataniu, a ich wyniki zamieszczono w tablicy 4.

B. Następnym szybem mrożeniowym, w którego obudowie betonowej zabudowano czujniki był szyb "Szczepan" kop. "Sosnowiec". Planowana głębokość mrożenia do poziomu 25 m. Zastosowaną recepturę betonu zamieszczono w tablicy 3. Wymagana wytrzymałość betonu 170 kG/cm^2.

Na poziomie 18 m zabudowano 3 czujniki (rys. 14b) z których jeden zlokalizowano w górotworze, a dwa w betonie.

Badania wytrzymałościowe przeprowadzono w sposób analogiczny jak na szybie "Jejkowice", a wyniki zestawiono w tablicy 4.
Rozkład temperatur w betonie i górotworze zamrożonym przedstawiono graficznie na rys. 14a.

Jak widzimy z wykresu przebieg temperatury w czasie dojrzewania betonu jest korzystny dla tego procesu. Beton osiągnął temperaturę maksymalną +24°C już pomiędzy 10 a 12 go-

Tablica 4

Miejsce pobrania prób / Dane o wytrzym. poszczególn. warstw	Wytrzymałość na ściskanie kG/cm^2 po 8 dniach			
	Od strony ociosu	Środkowa warstwa	Od środka szybu	Próbki "świadki"
Szyb "Jejkowice" kop. "Ignacy"	112,00	164,00	169,00	210,00
	150,00	184,00	184,00	184,00
	215,00	199,00	129,00	215,00
	166,00	182,00	161,00	203,00
Średnio	78,00	112,00	60,00	120,00
Szyb "Szczepan" kop. "Sosnowiec"	94,00	98,00	94,00	140,00
	102,00	114,00	96,00	132,00
Średnio	91,00	108,00	83,00	131,00
Szyb "Knurów V" kop. "Knurów"	138,00	115,00	120,60	198,00
	120,00	125,00	158,00	230,00
	220,00	109,00	120,50	215,00
Średnio	159,30	114,60	133,00	214,00

dziną od momentu mrożenia. Różnica temperatur w poszczególnych warstwach obudowy nie przekracza 3°C.
Wyrównanie temperatur w całym przekroju następuje po upływie 2,5 doby. Pomimo stosunkowo niewysokiej temperatury występującej w czasie wiązania i twardnienia betonu jej wpływ na ocieplenie ociosu jest znaczny (od -4°C do +4°C).

Temperaturę ujemną beton osiągnął dopiero po 65 dobach, a zatem posiadał dobre warunki dojrzewania.

C. Kolejną próbę pomiaru rozkładu temperatur oraz wytrzymałości przeprowadzono na szybie o średnicy ϕ 7,2 m "Knurów V" kopalni "Knurów". Szyb o głębokości 555 m z czego 372 m głębiono metodą mrożeniową.

Temperatura ociosów badana zwykłymi termometrami alkoholowymi w czasie głębienia szybu waha się w granicach od -7 do -12°C.
Rozkład temperatur mierzono na poziomie 112 m przy użyciu 4 czujników (rys. 15b), a wyniki przedstawiono graficznie na rys. 15a. Wyniki badań wytrzymałościowych zamieszczono w tablicy 4.

Jak wynika z wykresu (rys. 15a) wykonanie obudowy betonowej o grubości 90 cm jednorazowo pociąga za sobą wzrost temperatury w czasie wiązania i twardnienia betonu, powyżej 60°C co jest szczególnie niekorzystne dla betonu. Potwierdziły to uzyskane wyniki badań wytrzymałościowych.

D. Powtórzone badania w modelu-termosie nad rozkładem temperatur w betonie i górotworze zamrożonym oraz rozkładem wytrzymałości betonu w poszczególnych warstwach obudowy przyniosły wyniki (rys. 17 i tablica 5), które potwierdziły zauważone poprzednio w części 2 prawidłowości.

Bilans wodny wykonany dla dwu kolejnych prób (tablica 6) tłumaczy w pewnym stopniu uzyskiwane zróżnicowanie wytrzymałości w poszczególnych warstwach cylindrycznych obudowy szybu.

Tablica 5

Miejsce pobrania prób \ Dane o wytrzym. poszczególn. warstw.	Wytrzymałość na ściskanie kG/cm^2 po 8 dn.			
	Od strony ociosu	Środkowa warstwa	Od środka szybu	Próbki "świadki"
Model-termos	103,00	123,50	115,00	153,00
	79,00	155,00	109,00	151,00
	91,50	135,00	103,00	295,00
	115,00	-	109,00	125,00
	109,00	-	115,00	147,00
	103,00	-	126,00	-
Średnio	100,1	137,80	112,80	175,50

Tablica 6

Obudowa szybu "Knurów V"

Próba symbol (warstwa obud.)	Wilgoć	Woda półzwiązana (temp. 400°C)	Woda silnie związana krystalizacyjna (temp. 580°C)
Ocios			
Środek obud.	7,45	2,06	1,64
Wnętrze szybu	6,57	1,88	1,62
	7,12	2,64	2,16
Ocios			
Środek obud.	5,97	2,20	2,12
Wnętrze szybu	6,68	2,24	2,14
	6,66	2,08	1,60
Próbka "świadek"	5,92	3,48	2,98
Wartości średnie			
Ocios	6,71	2,13	1,88
Środek obud.	6,62	2,06	1,89
Wnętrze szybu	6,89	2,36	1,88

4. Wnioski końcowe

W oparciu o uzyskane wyniki badań modelowych oraz badań i obserwacji na szybach rzeczywistych, których fragmenty przedstawiono w drugim i trzecim podrozdziale niniejszej publikacji można wysunąć szereg wniosków zarówno dla celów projektowania jak i wykonawstwa, z których najważniejsze zostaną przedstawione poniżej:

- Temperatura w obudowie betonowej wykonywanej w warunkach górotworu zamrożonego utrzymuje się w przedziale dodatnim znacznie dłużej niż dotychczas przypuszczano. I tak w zależności od grubości obudowy ostatecznej, grubości i materiału obudowy wstępnej temperatury ciosu wreszcie zastosowanego cementu, okres ten z reguły wynosi 28 dni i więcej. W tym świetle jakość obudowy zależy w pierwszym rzędzie od jakości przygotowanej masy betonowej, stosunku wodno-cementowego oraz zastosowanej technologii transportu, układania i zagęszczania za odeskowaniem.
- Obudowa betonowa wykonywana w warunkach jak wyżej przy grubości powyżej 50 cm posiada zróżnicowaną wytrzymałość w poszczególnych warstwach. Zróżnicowanie to rośnie wraz ze wzrostem grubości.
- Przygotowanie betonów na bazie cementów o wysokim cieple hydratacji przy grubościach powyżej 60 cm jest niewskazane. W przypadkach gdy taka ewentualność zachodzi, wskazane jest zastosowanie odpowiednio skutecznej pielęgnacji drogą zraszania lub nawet zatapiania szybu, w ślad za wykonywaną obudową.
- Przy projektowaniu obudowy z betonów wysokich marek o grubości powyżej 60 cm należy przewidzieć zastosowanie cementów wyższych marek o umiarkowanej kaloryczności (cement drogowy, hutniczy itp.).
- Przypadki, w których warunki hydrogeologiczne wymagają zastosowania obudowy z betonu wysokich marek o grubości powyżej 60 cm lub w jej pobliżu, celem uniknięcia szkodliwego wpływu wydzielonego ciepła, proponuje się wykonanie tejże na raty wg jednego z następujących systemów:

a) przy pomocy deskowania dwustopniowego tzw. "kaskadowego" przy czym wyprzedzenie wynosiłoby 2 odcinki tj. 12-16 godzin,

b) obudowę wstępną wykonać krótkimi odcinkami z betonu układanego wprost na ocios na całej długości szybu. Po zgłębieniu strefy mrożeniowej nałożyć hydroizolację i wykonać betonową obudowę ostateczną metodą ślizgową.

c) obudowę wstępną wykonać z elementów siatkobetonowych (wg proj. ZBiD-BG) w całej strefie mrożeniowej, a następnie metodą ślizgu obudowę ostateczną z betonu monolitycznego.

- Powtórzone badania w modelu termosie z betonem o grubości 60 cm układanym wprost na górotwór zamrożony potwierdziły zaobserwowane uprzednio prawidłowości zarówno co do rozkładu temperatur jak i wytrzymałości w poszczególnych warstwach.

- Zaobserwowane przy badaniach modelowych oraz w warunkach naturalnych zróżnicowanie wytrzymałości w poszczególnych warstwach należy dodatkowo sprawdzić drogą wierceń rdzeniowych w obudowie.
  Tak pobrane próbki przebadać na ściskanie oraz od strony bilansu wodnego dla poszczególnych warstw.
  Dopiero taki zestaw wyników pozwoli na pewne uogólnienie zaobserwowanego zjawiska oraz przybliżone przedstawienie analityczne.

LITERATURA

[1] Grzymalski K. - Wyniki stosowania betonów wysokich marek dla szybów mrożeniowych. Biuletyn Informacyjny ZBG nr 1/2 1961 r.

[2] Kaufman S., Król W., Lebda E., Wojtan T. - Łączenie betonu w temperaturze ujemnej. Materiały Budowlane, Listopad 1967 r.

[3] Zajbert M. - Dojrzewanie betonu w niskich temperaturach w warunkach bezpośredniego kontaktu z zamrożonym gruntem, IOMB, Warszawa 1963 rok.

[4] Rułka K., Godziek J. - Problemy obudowy betonowej w szybach mrozeniowych. Rudy i Metale Nieżelazne 1969 r. nr 4.

[5] Rułka K., Godziek J. - Badania modelowe rzeczywistego przebiegu procesów wymiany ciepła dojrzewającego betonu ułożonego w górotworze zamrożonym. Budownictwo Górnicze 1967 nr 1.

RESEARCH WORK FOR DETERMINIG THE EFFECTIV HEAT EXCHANGE PROCESS AND CURING OF CONCRETE LINING AT SHAFTS SUNK BY THE FREEZING METHOD

S u m m a r y

Investigations made hitherto for the determining of the heat exchange process and curing of concrete in frozen strata were made at laboratories.

Results obtained in laboratory tests were different from results obtained at the time of shaftsinking wuth concrete lining in frozen strata.

Tests made on a thermos - model and under conditions "in situ", allowed the authors of this paper to explain the phenomena.

Examination by tests, of the heat exchange graphs, between the concrete lining and the frozen strata, allowed more accuratelly to explain the process itself. This may by considered in desings and planned controd of the heat exchange process.