ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1967
Seria: GÓRNICTWO z. 27 Nr kol. 193

Doc. dr inż. MIROSŁAW CHUDEK
Politechnika Śląska, Wydział Górniczy
Katedra Budownictwa Podziemnego Kopalń

Mgr inż. KAZIMIERZ RUŁKA
Zakład Badań i Doświadczeń PW - Katowice

ZASTOSOWANIE METODY ANALIZY WYMIANY CIEPLNEJ I UKŁADU TEMPERATUR DO PROJEKTOWANIA ORAZ KONTROLI PROCESU DOJRZEWANIA BETONU W OBUDOWIE SZYBÓW ZGŁĘBIANYCH METODĄ MROŻENIOWĄ

1. Wstęp

Od roku 1960 notuje się w budownictwie szybowym dynamiczny rozwój technologii wykonywania obudowy betonowej i to zarówno w szybach zgłębianych metodami zwykłymi, jak i specjalnymi. Z metod specjalnych szczególnie przyjęła się u nas metoda głębienia szybu z zamrażaniem skał. Praktyka wykazuje, że wykonanie szczelnej i wytrzymałej obudowy betonowej w szybach mrożeniowych jest szczególnie trudne i wymaga w dalszym ciągu rozwiązania wielu problemów, z których najważniejsze to:

- zbadanie warunków cieplnych dojrzewania betonu w czasie od chwili ułożenia go w obudowę do chwili spadku temperatury do $\pm 0^{o}C$,
- ustalenie na tej podstawie stopnia dojrzałości betonu w momencie jego zamarzania w celu ew. zastosowania środków dla zmiany warunków dojrzewania,
- zbadanie grubości warstwy górotworu, która ulegnie rozmrożeniu wskutek wymiany cieplnej z dojrzewającym betonem, w celu zapewnienia bezpiecznej grubości płaszcza lodowego.

Studia literatury krajowej z tego zakresu jak również przeprowadzone rozeznanie aktualnego stanu badań w ośrodkach krajowych (AGH, Politechnika Śląska, ITB, GIG, IOMB oraz laboratoria przedsiębiorstw wykonawczych) wykazały, iż u nas w kraju praktyka w tej dziedzinie wyprzedza znacznie teorię.

Prowadzone dotychczas prace badawcze, których celem było naukowe wyjaśnienie zjawisk związanych z układaniem betonu w górotworze zamrożonym, dotyczyły jedynie fragmentów tego szerokiego zagadnienia i z reguły były oparte na badaniach czysto laboratoryjnych, jak np. [5].

Szczególną zasługę w praktycznym rozwiązywaniu problemów związanych z wykonywaniem obudowy betonowej w szybach mrożeniowych, miały Działy Studiów (z laboratoriami przyzakładowymi i polowymi) przy takich przedsiębiorstwach wykonawczych jak PBSz Bytom, PRG Mysłowicie czy PBKRM Lubin.

Komórki te w miarę posiadanych sił i środków rozwiązywały na bieżąco występujące trudności w opanowaniu technologii, wykonania, transportu, układania i pielęgnacji betonu w szybach zamrożonych przy temperaturach na ociosie dochodzących do $-15^{o}C$.

W wyniku badań laboratoryjnych oraz prób przemysłowych, każda z wymienionych wyżej komórek opracowała własne receptury betonów oraz zdaniem ich optymalne, przy danych warunkach, technologie wykonania obudowy i pielęgnacji betonu.

Studiując wypracowane receptury oraz zalecane technologie można stwierdzić, iż zarówno projektowanie jak i realizacja, a następnie kontrola przebiegu procesów dojrzewania betonu oraz układu temperatur nie są ujednolicone, lecz wykonywane są w oparciu o kryteria przyjęte w budownictwie ogólnym oraz wskazanie praktyki przekazywane przez tradycje lub opublikowane w literaturze.

W związku z powyższym, nasuwa się stwierdzenie, że problem dojrzewania betonu w górotworze zamrożonym w odniesieniu do szybów nie został do chwili obecnej rozwiązany w sposób kompleksowy oparty na przesłankach naukowych. Powyższymi zagadnieniami zajął się nowo utworzony Zakład Badań i Doświadczeń Budownictwa Górniczego.

Z naukowym ujęciem niektórych zjawisk zachodzących w trakcie dojrzewania betonu w obecności gruntu zamrożonego spotykamy się po raz pierwszy w pracy M. Zajberta [3].

W pracy tej omówiono proces dojrzewania betonu w warunkach mrożenia oraz podano metodę projektowania i kontroli tego procesu w konstrukcji ściany przylegającej bezpośrednio do zamrożonego gruntu. Metoda ta oparta jest na najnowszych badaniach, przy czym uwzględnia zarówno opublikowane wyniki badań obcych jak i własne Instytutu Organizacji i Mechanizacji Budownictwa.

W pierwszej części pracy podano teoretyczne podstawy przemian cieplnych zachodzących w świeżo ułożonym betonie i metodę ich analizy. Podano również warunki fizykochemiczne, techniczne i technologiczne dla betonów dojrzewających w niskich temperaturach.

W drugiej części, opartej na badaniach procesu dojrzewania i mrozoodporności betonu, podano sposoby kontroli procesu dojrzewania betonu ułożonego w konstrukcji.

Mimo że przeprowadzone badanie (głównie laboratoryjne) przez w/wym. autora dla ograniczonej liczby parametrów, nie pozwalają na pełne uogólnienie zjawisk zachodzących przy wykonywaniu ścian betonowych w warunkach mrożenia gruntu, to są one jednak przyczynkiem do wprowadzenia pewnych uproszczeń w zakresie techniki i technologii wykonywania robót. Praca ponadto zawiera krytyczną analizę niektórych sposobów betonowania w warunkach zimowych oraz związanych z tym normatywnych wskazań.

Zasadniczo zjawiska poszczególnych procesów cieplnych i wymiany cieplnej towarzyszące betonowaniu w środowisku zamrożonym w większości są ujęte we wzory matematyczne, jednakże zastosowanie ich do obliczania bilansu cieplnego i badania stanów cieplnych jest trudne.

Wynika to głównie z dużej liczby parametrów zmiennych, najczęściej do siebie zależnych w bardzo różny sposób. To też w dotychczasowej praktyce śledzono jedynie przebieg poszczególnych faz procesów cieplnych za pomocą pomiarów cieplnych (przy użyciu mało dokładnych termometrów) w kolejności ich następowania, a następnie w miarę potrzeb podejmowano odpowied-

nie zabiegi energetyczne bądź chemiczne w celu uzyskania pożądanych kierunków zmian cieplnych.

W celu opracowania łatwej dla projektowania (dającej równocześnie wyniki najbardziej zbliżone do rzeczywistych) "metody analizy" procesu cieplnego M. Zajbert [3] poczynił pewne założenia upraszczające, z których najważniejsze to:

- Występująca w rzeczywistości zmienność strumienia cieplnego, wywoływana ośrodkiem cieplnym, jakim jest ściana betonowa, nie pozwala na zastosowanie znanej formuły ogólnej na pole cieplne w postaci

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial t^2}{\partial x^2},$$

  stąd autor ten stosuje sposób uproszczony, praktykowany często w przybliżonych odwzorowaniach stanów nie ustalonych, mianowicie rozpatruje bilanse cieplne w wąskich odpowiednio dobranych przedziałach czasu $\Delta \tau$ przy założeniu niezmienności parametrów pola i strumienia cieplnego w tym czasie (liniowej zmienności temperatur).
- Główna wymiana cieplna, decydująca o całym reżimie cieplnym, wystąpuje pomiędzy ścianą betonową a mrożonym gruntem stykającym się bezpośrednio z betonem (brak ścianki izolacyjnej typu"obudowa wstępna"z cegły klinkierowej). Natomiast płaszczyzna ściany od strony powietrznej jest izolowana cieplnie.
- W okresie interesujących nas faz procesu wymiany cieplnej średnie różnice temperatur podstawowej masy betonu i partii zamrożonego gruntu, w której będą zachodziły zmiany cieplne, nie podlegają znacznym wahaniom, a rzeczywisty przebieg linii temperatur może być zastąpiony liniowym.

Nowsze wyniki badań krajowych i zagranicznych pozwalają na dość dokładne obliczenie z góry bilansów cieplnych, szczególnie w pierwszych dniach dojrzewania betonu decydujących w zasadzie o jakości konstrukcji.

Istnieje bowiem możliwość, jak to czyni M. Zajbert, obliczania bilansów cieplnych dojrzewającego betonu w okresach

dobowych lub nawet w okresach trwania poszczególnych cykli roboczych.

Do obliczeń tych konieczna jest jednak znajomość charakterystyki cieplnej mrożonego środowiska, charakterystyk cieplnych stosowanych składników betonu, a w szczególności znajomość przebiegu reakcji egzotermicznych dla cementu i akceleratorów, których użycie do mieszanki betonu jest przewidywane.

Wyprowadzona przez M. Zajberta uproszczona metoda analizy procesu cieplnego ujmuje w zasadzie przypadek płaskiej pionowej ściany betonowej o nieograniczonej powierzchni, przylegającej z jednej strony bezpośrednio do mrożonego gruntu nasyconego wodą, a z drugiej strony stykającej się z przestrzenią powietrzną, a więc takich jak mury oporowe, płyty fundamentowe, zbiorniki wgłębne o dużej średnicy (małej krzywiźnie) sztolnie o przekroju prostokątnym itp.

Bezkrytyczne zastosowanie wymienionej metody do warstw o powierzchniach zakrzywionych bez odpowiedniej modyfikacji wzorów zwłaszcza dla większych krzywizn (szyby, studnie) daje już w samym założeniu znaczne rozbieżności pomiędzy wynikami a rzeczywistością.

W związku z powyższym w celu przystosowania przedstawionej przez M. Zajberta metody analizy wymiany cieplnej i układu temperatur do określania warunków betonowania obudowy szybów (studni) zgłębianych w górotworze zamrożonym, zostaną w rozdziale 2 niniejszego artykułu wyprowadzone zmodyfikowane wzory pozwalające w sposób prosty na uchwycenie wpływu krzywizny ścian na przebieg procesu wymiany ciepła.

2. Reżim cieplny górotworu mrożonego (szybu lub sztolni) oraz betonu dojrzewającego w tym środowisku

2.1. Podstawy teoretyczne

2.1.1. Charakterystyka górotworu zamrożonego

Najczęściej spotykanym sposobem odcinania wód gruntowych i zestalania słabych warstw wodonośnych górotworu (w celu zgłę-

biania) 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 przewodności λ = = 1,5-3 kcal/m godz. ^{o}C).

Niebezpieczeństwo grozi tutaj zarówno betonowi (poprzez przedwczesne zamrożenie, czy penetracja agresywnych wód z roztajałego górotworu do świeżo ułożonej masy betonowej) jak i płaszczowi lodowemu, którego grubość może się wydatnie zmniejszyć przez nadmierne podgrzanie składników i ciepło hydratacji cementu, co powoduje zmniejszenie grubości płaszcza lodowego oraz grozi przerwaniem się wody do szybu, uszkodzeniem rur mrożeniowych czy osunięciem się skał do szybu.

Charakterystyczny układ temperatur w górotworze zamrażanym przy użyciu pionowych rur mrożeniowych, obrazuje funkcja (1, 2) ujęta znanym równaniem

$$q = \frac{dt}{dr} \cdot \lambda_n \cdot 2\pi \cdot r \qquad (1)$$

którą przedstawiono na rys. 1,

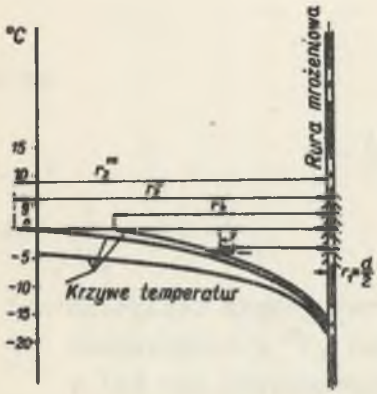
gdzie:

q - ilość ciepła przechodzącego w jednostce czasu przez powierzchnię cylindra o średnicy r i wysokości 1 m.

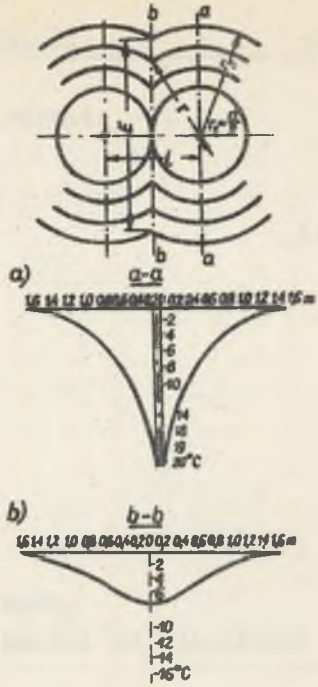
Zależność między t i r przedstawiają wzory wg (1, 2):

a) dla przekroju przez rurę szybową

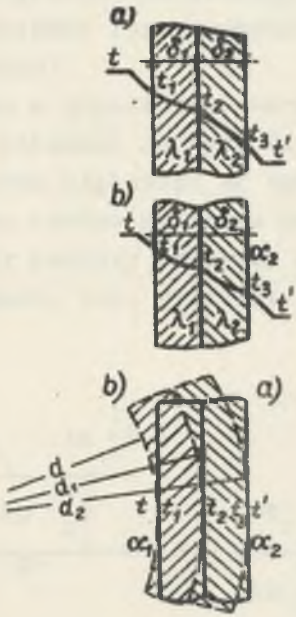
$$t = \frac{t_{r_1} \cdot \ln \frac{r_2}{r}}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \qquad (2)$$



Rys. 1. Rozkład temperatur w górotworze mrożonym za pomocą pionowej rury mrożeniowej



Rys. 2. Rozkład temperatur w górotworze mrożonym za pomocą szeregu rur mrożeniowych



Rys. 3. Rozkład temperatur w przylegających do siebie warstwach o różnych charakterystykach przewodności cieplnej w warstwach zakrzywionych (koncentrycznych)

b) dla przekroju pośredniego między rurami

$$t = -\frac{t_{r_1} \cdot \ln \frac{2r_2}{\sqrt{4b+l^2}}}{r_2} \qquad (3)$$

gdzie:

$$b = \frac{l}{2}\sqrt{\frac{4\ r_2^2}{e^{2M}} - l^2}$$

$$M = \frac{t}{t_{r_1}} \cdot \ln \frac{r_2}{r}$$

l - odległość między rurami mrożeniowymi,

t - temperatura w ^{o}C, zmienna w zależności od odległości r (od rur mrożeniowych),

r - promień pierścienia izotermy temperatury t,

r_1 - promień rury mrożeniowej,

r_2 - promień walca gruntu zamrożonego,

t_{r_1} temperatura ścianki rury mrożeniowej (górotworu przylegającego do rury)

Rozkład temperatur w górotworze zamrożonym za pomocą szeregu rur mrożeniowych pokazano na rys. 2.

Wielkości temperatur obliczane wg wyżej przytoczonych wzorów matematycznych są bardzo zbliżone do otrzymywanych w praktyce, co potwierdziły pomiary wykonane w wielu szybach. Charakterystyczną wielkość, tzw. gradient temperatury określa się wg wzoru

$$\text{gradt} = \frac{dt}{dr} = \frac{d \cdot \frac{t_{r_1} \cdot \ln \frac{r_2}{r}}{\ln \frac{r_2}{r_1}}}{dr} = -\frac{t_{r_1}}{r \ln \frac{r_2}{r_1}} = -\frac{2\ tr_1}{d \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}} \qquad (4)$$

Ilość ciepła przenikającego przez cylinder zamrożonego górotworu do jednostki powierzchni otworu mrożeniowego w czasie jednej godziny obliczamy wzorem

$$q_F = \left(\frac{dt}{dr}\right)_{r=r_1} \cdot \lambda_1 = - \frac{2\, tr_1 \cdot \lambda_1}{d_1 \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}} \tag{5}$$

zaś na 1 mb studzienki

$$q_F = \left(\frac{dt}{dr}\right)_{r=r_1} \cdot \lambda_1 \cdot \pi \cdot d = - \frac{2\, t_{r_1} \cdot \lambda_1 \cdot \pi}{\ln \frac{d_2}{d_1}} \tag{6}$$

Wymiana ciepła między warstwami odbywa się wg znanych wzorów. Dla warstw o powierzchniach cylindrycznych o jednolitej krzywiznie kołowej (pierścieni) spotykanej przy budowie szybów

$$q = \alpha_1 (t-t_1) = \frac{2\lambda_1}{d_1 \cdot \ln \frac{d_1}{d}} (t_1 - t_2) = \frac{2 \cdot \lambda_2}{d_2 \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}} (t_2 - t_3) =$$

$$= \text{itd. ....} \tag{7}$$

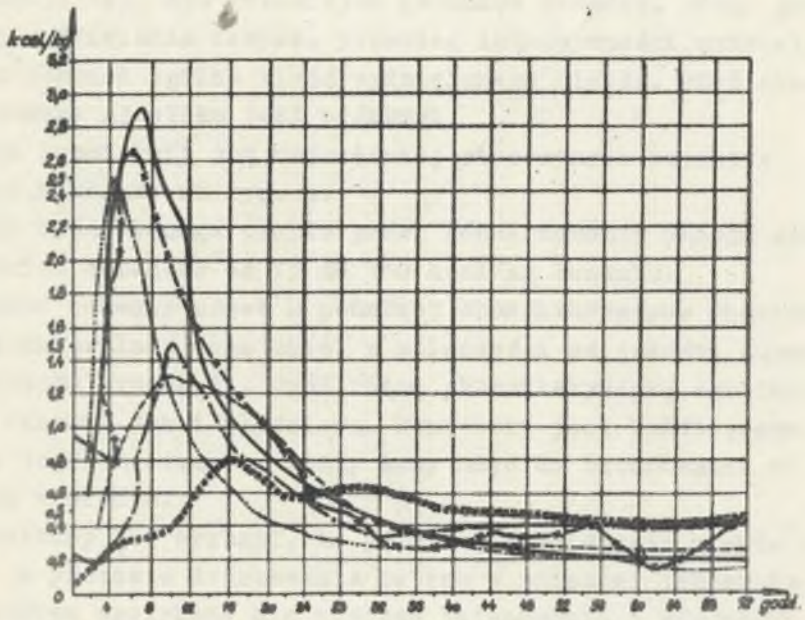
zaś

$$t_1 = t - \frac{k}{\alpha_1} (t - t'), \quad t_2 = t_1 - k\,(t-t') \frac{d_1 \cdot \ln \frac{d_1}{d}}{2 \cdot \lambda_1}, \tag{8}$$

gdzie:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{d_1}{2\lambda_1} \cdot \ln \frac{d_1}{d} + \frac{d_2}{2\lambda_2} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \text{itd.} + \frac{1}{\alpha_2}. \tag{9}$$

Rozkład temperatur w przylegających do siebie warstwach o różnych charakterystykach przewodności cieplnej w warstwach zakrzywionych (koncentrycznych), pokazano na rys. 3.



Rys. 4. Wykres egzotermii cementów krajowych stosowanych do obudowy szybów

——— cement szybkosprawny "Super 400", ----- cement portlandzki "250", ····· cement portlandzki "250 + 2% $CaCl_2$"
—×—×— cement portlandzki "450", —·—·— cement portlandzki "350"
×××××××× cement żużlowy "250"

2.1.2. Charakterystyka masy betonowej

Z punktu widzenia charakterystyki cieplnej, masa betonowa ułożona w konstrukcji jest ośrodkiem czynnym ze względu na egzotermiczność reakcji hydratacji cementu.

W reakcji tej, dla rozmaitych gatunków cementu, różny jest początek wydzielania ciepła, przebieg intensywności wydzielania, jak również ogólna ilość wydzielanego ciepła, choć charakter samego zjawiska jest podobny.

Wykres egzotermii dla najczęściej stosowanych cementów krajowych pokazano na rys. 4.

Ilości wydzielanego ciepła przez różne cementy wahają się dla polskich cementów od 75 do 110 kcal/kg cementu.

Ponieważ cementy nawet o podobnej charakterystyce chemicznej i strukturalnej mogą mieć, w zależności od jakości surowców i sposobu produkcji, dość różną charakterystykę egzotermii, zarówno czasową jak i ilościową, konieczne jest każdorazowe zbadanie jej dla cementu, który mamy użyć do betonowania w warunkach mrożenia.

E. Rastrupp [4] wykazał, iż przebieg wydzielania ciepła hydratacji w procesie dojrzewania betonu w zmiennej temperaturze, z którym spotykamy się podczas betonowania w warunkach mrożenia, można określić za pomocą funkcji czasu i temperatury (analogicznie jak wskaźnik wytrzymałości betonu):

$$\tau_a = \int_{\tau_1}^{\tau_2} f(t) \cdot d\tau , \qquad (10)$$

gdzie:

τ_a - czas dojrzewania betonu (w godz.) w procesie o stałej temperaturze,

τ - czas dojrzewania betonu w procesie o zmiennej temperaturze (od τ_1 do τ_2)

$$f(t) = 2^{\frac{t-ta}{10}} \quad \text{lub} \quad \lg f(t) = 0{,}0301 \cdot (t-ta) \qquad (11)$$

Funkcję tę wyprowadzono opierając się na aksjomacie chemii fizycznej, który brzmi: szybkość reakcji podwaja się, jeżeli temperatura, w której odbywa się proces, wzrośnie o $10^{o}C$.

Jak z tego widać, znając przebieg wydzielania ciepła w procesie hydratacji dla jakiejś stałej temperatury i określonego cementu, można za pomocą podanego wyżej równania określić przebieg wydzielania ciepła przy innej temperaturze, a następnie również i przy procesie o zmiennej temperaturze.

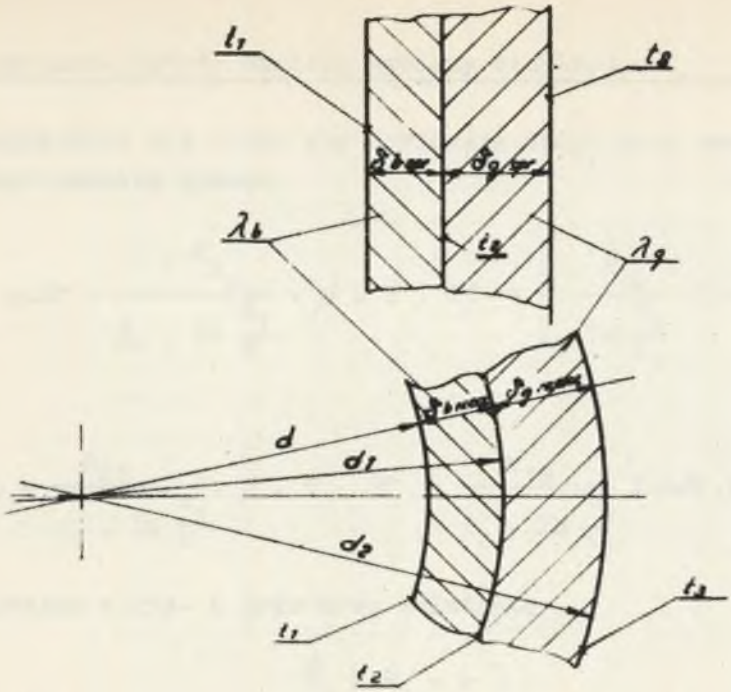
Krzywe wzrostu ilości ciepła wydzielanego przez cement w procesie hydratacji, przebiegającym w różnych temperaturach oraz krzywe wzrostu wytrzymałości betonu, dojrzewającego w różnych temperaturach, w zależności od czasu dojrzewania obrazują nam wykresy (diagramy Hallströma) pokazane na rys. 5.

Jak wynika z tych wykresów, dla betonu ułożonego świeżo w środowisku temperatur niskich najniekorzystniejszy jest okres początkowy kiedy - przed rozpoczęciem właściwego procesu egzotermii - beton traci ciepło zawarte w jego składnikach. Beton w tym czasie może zbytnio ostygnąć, to zaś z kolei może zadecydować o zmniejszeniu intensywności hydratacji w takim stopniu, że wydzielane ciepło nie wystarczy do podtrzymania procesu hydratacji i twardnienia betonu. Wówczas ilość wydzielanego ciepła będzie mniejsza od traconego i beton w krótkim czasie może ulec zamrożeniu.

2.2. Analiza zmian temperatury betonu ułożonego w strefie mrożonej szybu

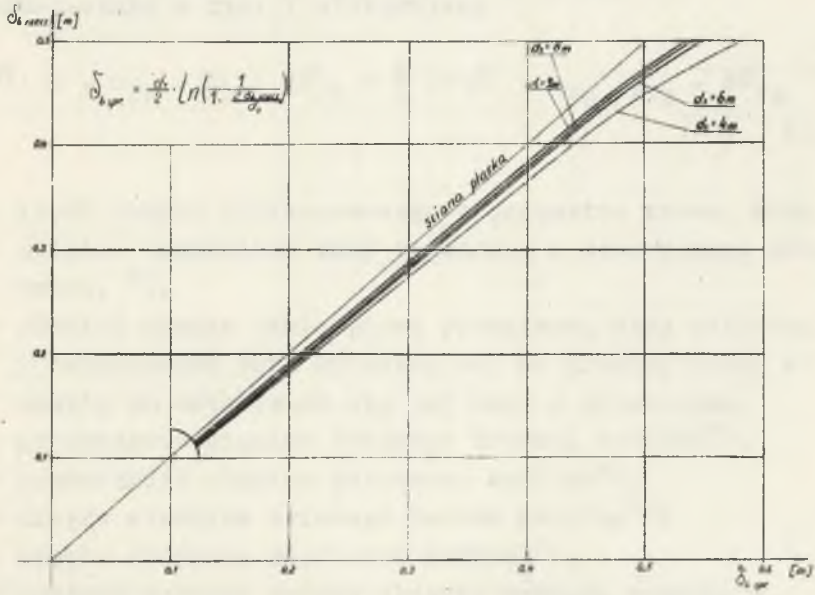
Dla uproszczenia zagadnienia bierzemy pod uwagę jedynie najczęściej spotykany w praktyce budownictwa szybowego przypadek tj. ściany zakrzywione o warstwach koncentrycznych, i dla tego układu przeprowadzamy analizę.

Ilość ciepła przekazywana w okresie czasu $d\tau$ z masy betonowej do zamrożonego górotworu na 1 m^2 ściany (dla przypadku,



Rys. 8. Cylindryczna warstwa betonu biorąca udział w wymianie ciepła

Rys. 9. Warstwa zastępcza płaska



Rys. 10. Grubość sprowadzona obudowy betonowej dla różnych średnic wyłomu

gdy stykające się ciała nie zawierają wody) przy warstwach koncentrycznych wynosi

$$dQ = q.d\tau = \frac{2 \cdot \lambda_{2_b}}{d_1 \cdot \ln \frac{d_1}{d}} \cdot \beta \cdot T \cdot d\tau = \frac{2 \cdot \lambda_{1g}}{d_2 \ln \frac{d_2}{d_1}} \cdot (1-\beta) \cdot T \cdot d\tau$$

lub

$$dQ = \frac{\lambda_{2b}}{r_1 \cdot \ln \frac{r_1}{r}} \cdot \beta \cdot T \cdot d\tau = \frac{\lambda_{1g}}{r_2 \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}} (1-\beta) \cdot T \cdot d\tau \quad (12)$$

Przyjmując z rys. 6 dodatkowe założenie

$$\left.\begin{aligned} \delta_b &= r_1 - r \\ \delta_g &= r_2 - r_1 \end{aligned}\right\} \quad (12a)$$

oraz jednocześnie z rys. 7 otrzymujemy

$$dQ = \frac{1}{2}\beta \cdot T \cdot c_{2b} \cdot \gamma_{2b} \cdot d\delta_{2b} = \frac{1}{2}(1-\beta) \cdot c_{1g} \cdot \gamma_{1g} \cdot d\delta_{1g} \quad (13)$$

gdzie:

- Q - ilość ciepła przekazywanego w jednostce czasu, kcal,
- T - różnica temperatur masy betonowej i zamrożonego górotworu, ^oC,
- $\beta.T$ - różnica między temperaturę początkową masy betonowej i temperaturą jaka wytworzy się na granicy styku w chwilę po zetknięciu się tej masy z górotworem,
- λ_b - przewodność cieplna świeżego betonu, kcal/mh^oC,
- λ_g - przewodność cieplna górotworu kcal/mh^oC,
- C_b - ciepło właściwe świeżego betonu kcal/kg^oC,
- c_g - ciepło właściwe górotworu kcal/kg^oC,
- δ_b - grubość warstwy betonu objętej wymianą ciepła, m.
- δ_g - grubość warstwy górotworu objętej wymianą ciepła, m.

Indeksy 1 i 2 przy oznaczeniach λ, c, γ i δ rozróżniają, które z tych wielkości odnoszą się do zamrożonego, np. λ_{1g}, a które do niezamrożonego ośrodka, np. λ_{2g}.
Z równań (12) i (13) otrzymujemy

$$d\tau = \frac{r_1 \cdot \ln \frac{r_1}{r} \cdot c_{2b} \cdot \gamma_{2b} \cdot d\delta_{2b}}{2 \cdot \lambda_{2b}} \tag{14}$$

$$d\tau = \frac{r_2 \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} c_{1g} \cdot \gamma_{1g} \, d\delta_{1g}}{2 \cdot \lambda_{1g}} \tag{15}$$

Po uwzględnieniu wzoru (12a) oraz scałkowaniu otrzymamy:

$$\tau = \frac{r_1 \cdot c_{2b} \cdot \gamma_{2b}}{2 \cdot \lambda_{2b}} (\delta_{2b} - r_1) \cdot (\ln \frac{r_1}{r_1 - \delta_{2b}} + 1) \tag{16}$$

$$\tau = \frac{c_{1g} \cdot \gamma_{1g}}{2 \cdot \lambda_{1g}} \cdot \frac{(r_1 + \delta_{1g})^2}{2} (\ln \frac{r_1 + \delta_{1g}}{r_1} - \frac{1}{2}) \tag{17}$$

Do dalszych rozważań potrzebne jest obliczenie wartości δ_{2b} oraz δ_{1g}, tj. grubości warstw (betonu, górotworu) biorących udział w wymianie.

Wielkości tych z wyprowadzonych wyżej wzorów nie można wyznaczyć analitycznie, a jedynie metodą wykreślną.

Fakt ten komplikuje dalsze rozważania.

Aby je uprościć wprowadzimy do dalszych rozważań pojęcie tzw. "grubości sprowadzonej" warstwy betonu (górotworu) objętej wymianą ciepła.

Df. Przez grubość sprowadzoną rozumiemy grubość warstwy płaskiej całkowicie równoważnej pod względem przewodnictwa cieplnego warstwie cylindrycznej

Po wprowadzeniu tego pojęcia wszystkie rozważania cieplne prowadzimy jak dla warstw płaskich (co pozwala na wyeliminowanie trudności rachunkowych), a po obliczeniu z odpowiednich równań grubości sprowadzonych przeliczamy je na grubości rzeczywiste.

W ten sposób:

- zachowamy prostotę obliczeń charakterystyczną dla bilansu cieplnego warstw płaskich,
- uzyskamy większą dokładność obliczeń poprzez uwzględnienie krzywizny warstw (wprowadzone pojęcie grubości sprowadzonej).

Dla wyprowadzenia wzoru na grubość sprowadzoną warstwy betonu objętej wymianą ciepła - wyobraźmy sobie cylindryczną warstwę betonu o współczynniku przewodności λ_b (kcal/mh°C) i wymiarach jak na rys. 8.

Ilość przewodzonego ciepła w jednostce czasu na 1 m^2 powierzchni

$$q = \frac{2 \cdot \lambda_b}{d_1 \cdot \ln \frac{d_1}{d}} (t_1 - t_2) \tag{18}$$

Wyobraźmy sobie teraz warstwę płaską jak na rys. 9, która przewodzi taką samą ilość ciepła przy tej samej różnicy temperatur $t_1 - t_2$ i tym samym współczynniku λ_b.
Grubość tej warstwy oznaczymy przez $\delta_{b\ spr.}$

Ilość przewodzonego ciepła w jednostce czasu na 1 m^2 powierzchni

$$q = \frac{\lambda_b}{\delta_{b\ spr.}} (t_1 - t_2) \tag{19}$$

Następnie porównujemy wartości q z równań (18) i (19)

$$q = \frac{2 \cdot \lambda_b}{d_1 \cdot \ln \frac{d_1}{d}} (t_1 - t_2) = \frac{\lambda_b}{\delta_{b\ spr.}} (t_1 - t_2) \tag{20}$$

Stąd po uproszczeniu oraz uwzględnieniu, że:

$$d = d_1 + 2 \cdot \delta_{b\ rzecz} \tag{21}$$

otrzymamy:

$$\delta_{b\ spr} = \frac{d_1}{2} \ln \frac{1}{1 - \frac{2 \cdot \delta_{b\ rzecz}}{d_1}} \tag{22}$$

Zależność $\delta_{b\ spr} - \delta_{b\ rzecz}$ dla charakterystycznych średnic szybów zgłębianych metodą mrożeniową pokazano na wykresie rys. 10.

Analogiczne rozumowanie przeprowadzamy dla warstw górotworu zamrożonego.

Po podstawieniu otrzymujemy:

$$q = \frac{\lambda_g}{\delta_{g\ spr}} (t_2 - t_3) = \frac{2 \cdot \lambda_g}{d_2 \cdot \ln \frac{d_2}{d_1}} (t_2 - t_3) \tag{23}$$

skąd

$$\delta_{g\ spr} = \frac{d_2}{2} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} \tag{24}$$

zaś po uwzględnieniu, że:

$$d_2 = d_1 + 2 \cdot \delta_{g\ rzecz} \tag{25}$$

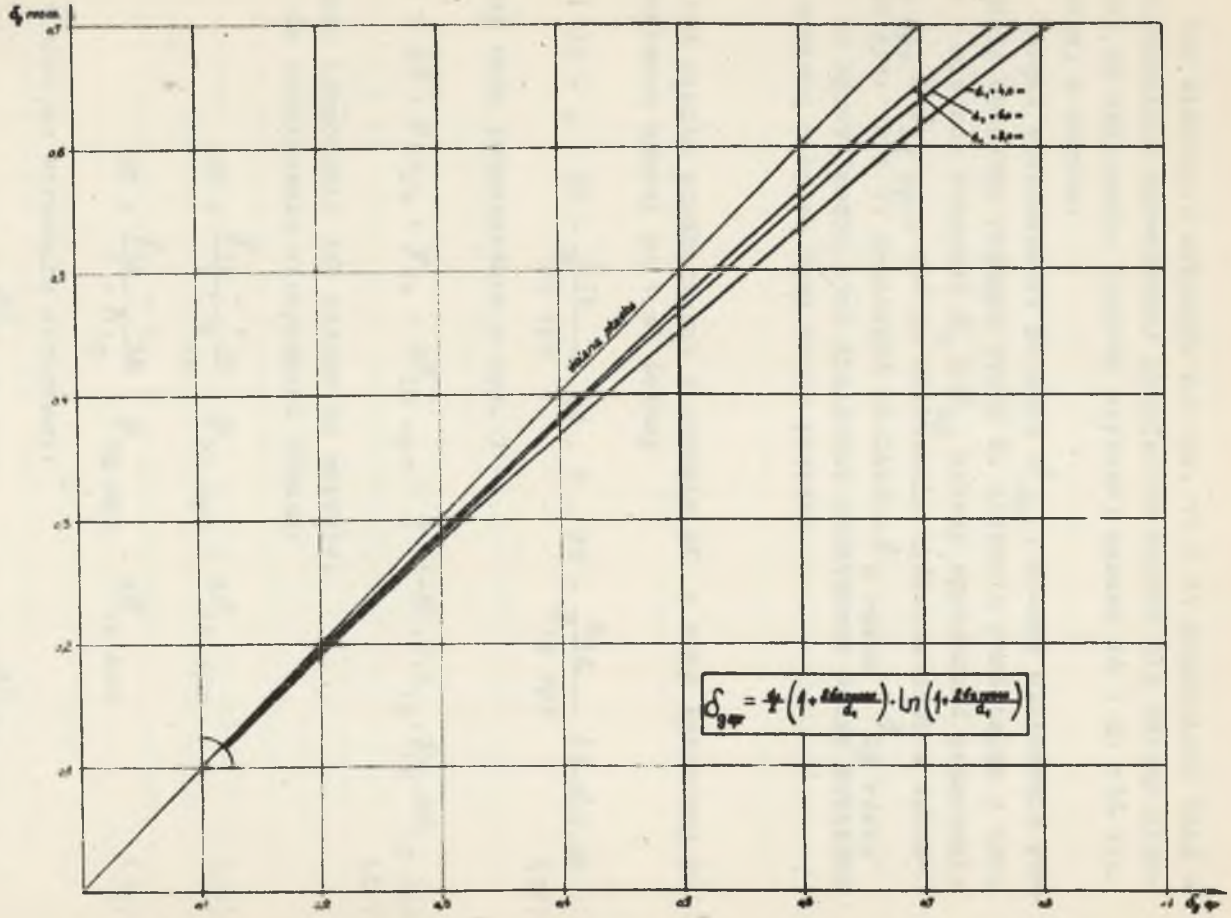
$$\delta_{g\ spr} = \frac{d_1}{2} \left(1 + \frac{2 \cdot \delta_{g\ rzecz}}{d_1}\right) \cdot \ln \left(1 + \frac{2\ \delta_{g\ rzecz}}{d_1}\right) \tag{26}$$

Zależność $\delta_{g\ rzecz} - \delta_{g\ spr}$ dla podstawowych średnic szybów przedstawiono na wykresie rys. 11.

Zależność $\delta_{g\ spr} = f(\delta_{g\ rzecz})$ naniesione na wykresy dla różnych średnic szybu tworzą rodzinę charakterystyk (krzywych).

Analizując te wykresy możemy stwierdzić, że:

- odchyłki (różnice) $\delta_{rzecz} - \delta_{spr}$ rosną wraz ze wzrostem δ_{rzecz},
- odchyłki (różnice) $\delta_{rzecz} - \delta_{spr}$ rosną wraz ze zmniejszaniem się średnicy szybu (zwiększeniem krzywizny) w wyłomie.



Rys. 11. Grubość sprowadzona warstwy górotworu zamrożonego dla różnych średnic wyłomu

Jak widzimy z wykresów na rys. 10 i 11 popełniony błąd w obliczeniach spowodowany przyjęciem wzorów dla ściany płaskiej do obliczania obudowy szybowej wynosi od 3 do 15% dla każdej z warstw.

Dzięki wprowadzeniu pojęcia δ_{spr}, możemy obliczenia prowadzić sposobem podanym przez M. Zajberta pamiętając o tym, że w miejsce oznaczeń δ_b i δ_{2g} należy wprowadzić oznaczenia $\delta_{b\ spr}$ i $\delta_{2g\ spr}$, zaś po obliczeniu tych wartości z wykresów rys. 10 i 11 wyznaczyć wielkości $\delta_{b\ rzecz}$ i $\delta_{2g\ rzecz}$.

Po wprowadzeniu tych wielkości podstawowe wzory związane z wymianą cieplną będą miały postać:

Ilość ciepła przekazywana w okresie $d\tau$ z masy betonowej do górotworu wynosi na 1 m^2 ściany

$$dQ = q \cdot d\tau = \frac{\lambda_{2b}}{\delta_{2b\ spr}} \cdot \beta \cdot T \cdot d\tau = \frac{\lambda_{1g}}{\delta_{1g\ spr}} (1-\beta) T \cdot d\tau \tag{27}$$

przy czym jednocześnie z rys. 7

$$dQ = \frac{1}{2}\beta \cdot T \cdot c_{2b} \cdot \gamma_{2b} \cdot d\delta_{2b\ spr} = \frac{1}{2}(1-\beta) \cdot T \cdot c_{1g} \cdot \gamma_{1g} \cdot d\delta_{1g\ spr} \tag{28}$$

gdzie oznaczenia jak podano na wstępie.

Po rozwiązaniu otrzymanych równań:

$$d\tau = \frac{\gamma_{2b} \cdot c_{2b}}{2 \cdot \lambda_{2b}} \cdot \delta_{2b\ spr} \cdot d\delta_{2b\ spr} \tag{29}$$

$$d\tau = \frac{\gamma_{1g} \cdot c_{1g}}{2 \cdot \lambda_{1g}} \cdot \delta_{1g\ spr} \cdot d\delta_{1g\ spr} \tag{30}$$

Całkując wyrażenia otrzymamy:

$$\tau = \frac{1}{4} c_{2b} \cdot \gamma_{2b} \cdot \frac{\delta^2_{2b\ spr}}{\lambda_{2b}} = \frac{1}{4} \cdot c_{1g} \cdot \gamma_{1g} \frac{\delta^2_{1g\ spr}}{\lambda_{1g}} \tag{31}$$

skąd

$$\delta_{2b\ spr} = 2 \cdot \sqrt{\frac{\lambda_{2b} \cdot \tau}{c_{2b} \cdot \gamma_{2b}}} \tag{32}$$

$$\delta_{1g\ spr} = 2 \cdot \sqrt{\frac{\lambda_{1g} \cdot \tau}{c_{2b} \cdot \gamma_{2b}}} \tag{33}$$

Po obliczeniu wartości liczbowych tych wielkości z wykresów na rys. 10 i 11 wyznaczamy wartości $\delta_{2b\ rzecz}$ i $\delta_{1g\ rzecz}$.

Tak wyznaczone wartości podstawiamy do kolejnych wzorów obliczanego bilansu wymiany.

A więc:

$$Q = \frac{1}{2}\beta \cdot T \cdot \delta_{2b\ rzecz} \cdot c_{2b} \cdot \gamma_{2b} = \frac{1}{2}(1-\beta) \cdot T \cdot \delta_{1g\ rzecz} \cdot c_{1g} \cdot \gamma_{1g} \tag{34}$$

skąd

$$\beta = \frac{\delta_{1g\ rzecz}\ c_{1g} \cdot \gamma_{1g}}{\delta_{1g\ rzecz} \cdot c_{1g} \cdot \gamma_{1g} + \delta_{2b\ rzecz} \cdot c_{2b} \cdot \gamma_{2b}} \tag{35}$$

itd.

W dalszym ciągu analizę prowadzimy wg M. Zajberta [3] traktując obudowę szybu jako ścianę płaską.

Podany przez M. Zajberta sposób analizy, aczkolwiek żmudny i dający przybliżony obraz przebiegu zmian temperatur w betonie (patrz założenia) pozwala jednak na osiągnięcie wyników wystarczająco dokładnych dla projektowania, a następnie śledzenia procesu dojrzewania betonu w części konstrukcji przylegającej do zamrożonego górotworu.

Należy jednak zwrócić uwagę na niebezpieczeństwo sumujących się błędów, powstających wówczas, gdy zakłada się niezmienność układu temperatur w kolejnych odstępach czasu τ^{I}, τ^{II-1}, τ^{II-2} ... Faktycznie bowiem mamy do czynienia z ciągłą zmianą układu.

Dlatego w trakcie analizy należy sprawdzać bilanse cieplne w uzyskiwanych układach i wprowadzać wynikające z tej kontroli poprawki.

Przy znajomości kierunków i wielkości zmian, możemy uniknąć poważniejszych błędów, gdyż można odpowiednio dobierać okresy czasu, w których rozpatrujemy kolejne stany.

Przedstawiona tutaj przystosowana do szybów "metoda analizy" jest w chwili obecnej sprawdzana na zaprojektowanym przez autorów tzw. "modelu - termosie" - odwzorowującym wiernie warunki rzeczywiste z zastosowaniem automatycznej aparatury pomiarowej w szybie mrożeniowym "Jejkowice" kop. Ignacy.

Wyniki badań zostaną opublikowane w kolejnym artykule z tego cyklu.

LITERATURA

[1] Trupa N.G.: Spjecialnyje sposoby prowjedjenija gornych wyrabotok. Moskwa 1964.

[2] Izdatjelstwo Akadjemii Nauk SSSR: Zamorażiwanije gornych porod pri prochodje stwołow szacht. Moskwa 1961 r.

[3] Zajbert M.: Dojrzewanie betonu w niskich temperaturach w warunkach bezpośredniego kontaktu z mrożonym gruntem. Warszawa 1963.

[4] Rastrupp E.: Heat of Hydratation. Magazin of Concrete Research. Vsl. C. nr 17 1964.

[5] Kaufman S., Król W., Lebda E., Wojtan T.: Tężenie betonu w temperaturze ujemnej. Materiały Budowlane. Listopad 1957.