

Tadeusz Bobko

MODELOWANIE UWARUNKOWAŃ CIEPLNO-FIZYCZNYCH W INŻYNIERII PROCESOWEJ BETONOWANIA ZIMOWEGO

Wprowadzenie

Analiza i prognozowanie tendencji zmian wartości potencjału energetycznego w procesie uzyskania projektowanej wytrzymałości betonu, w warunkach występowania ujemnych temperatur otoczenia, polega na stosowaniu metody wyznaczania parametrów trendu zmian klimatu oraz parametrów procesu tężenia mieszanki betonowej, zapewniających uzyskanie odpowiedniej wytrzymałości przez beton elementu konstrukcyjnego. Zmiany temperatury otoczenia w tak szerokim przedziale, od -5°C do -25°C , jak wskazuje praktyka betonowania zimowego, dają możliwość uzyskiwania przez beton odporności mrozowej przy zakładanych uwarunkowaniach cieplno-fizycznych procesu betonowania i pielęgnacji betonu. Tworzy się określony model procesu cieplno-fizycznego, zapewniający wymagany nakład energii cieplnej, niezbędny do uzyskania przez beton projektowanej wytrzymałości.

Prognozowania dokonuje się za pomocą metody analizy regresji z zastosowaniem optymalizacyjnych modeli matematycznych, opracowanych w oparciu o możliwości matematyki stosowanej. Schemat blokowy algorytmu obliczeniowego i stosowanych programów komputerowych przedstawiony został w publikacji [1].

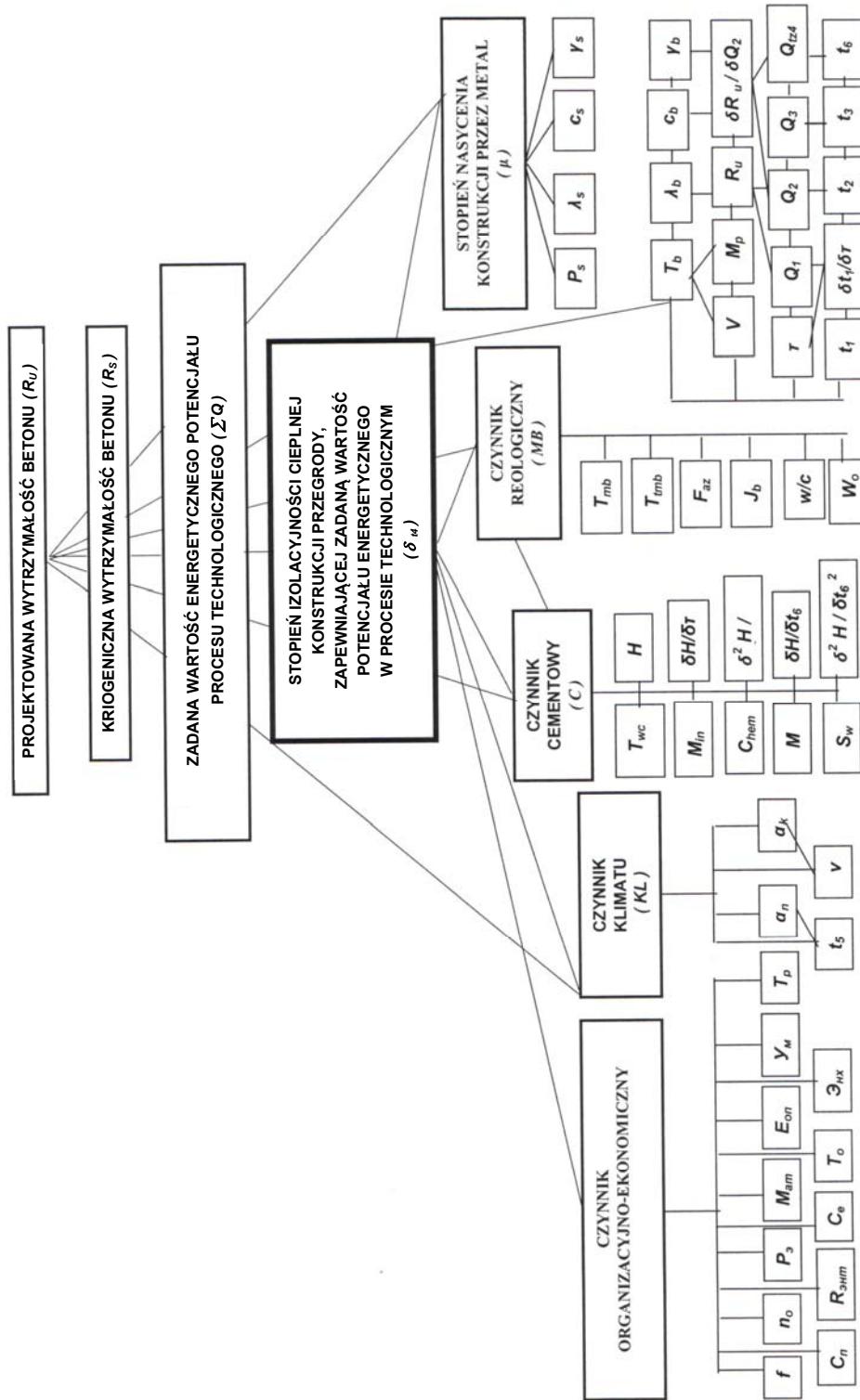
Doskonalenie procesu prognozowania, dokładność i związana z nią wiarygodność inżynierskich rozwiązań organizacyjnych i technologicznych polegają, między innymi, na wiedzy i umiejętnościach modelowania i optymalizacji wzajemnych powiązań czynników o zróżnicowanej naturze: materiałowo-konstrukcyjnych, technologicznych, organizacyjnych i klimatycznych. W artykule przedstawiona została propozycja energooszczędnej metody betonowania w warunkach zimowych, wskazująca uwarunkowania technologiczne zabezpieczające przed destrukcją mrozową.

Celem jest zbadanie cieplno-fizycznych uwarunkowań procesu uzyskania odporności mrozowej przez beton elementu konstrukcyjnego w temperaturach obniżonych i zimowych przy optymalnym zużyciu ciepła i dotrzymanie tych uwarunkowań do czasu uzyskania projektowanej wytrzymałości kriogenicznej.

1. Czynniki i parametry uwzględniane w zależności opisującej potencjał energetyczny w procesie uzyskania przez beton wytrzymałości w warunkach ujemnych temperatur otoczenia

I. Cechy fizyczne i mechaniczne materiałów, elementów konstrukcyjnych

- B - klasa betonu,
C - ilość cementu, kg/m^3 ,
Chem - skład chemiczny cementu,
Faz - skład fazowy betonu,
H - ciepło uwodnienia cementu, kJ/kg ,
 M_c - marka cementu,
Min - skład mineralny klinkieru cementowego lub mieszanki składów syntetycznych,
 M_p - moduł powierzchniowy (czynnik kształtu) elementów konstrukcyjnych, m^{-1} ,
n - ilość cykli zamrażania i odmrażania, cykl,
p - ciśnienie wywierane na świeży beton, MPa ,
 P_s - ilość stali zbrojeniowej i wkładek montażowych, kg/m^3 ,
 Q_{ad} - ciepło adsorpcji wody przez powierzchnię ziaren cementu, J,
 Q_{adn} - ciepło adsorpcji wody przez struktury nowe, J,
 Q_{ch} - ciepło reakcji chemicznej, J,
 Q_{kr} - ciepło tworzenia się kryształów, J,
 Q_r - ciepło rozcieńczania, J,
 Q_s - ciepło solwatacji, J,
 R_s - normowa wytrzymałość betonu na ściskanie, MPa ,
 R_u - wytrzymałość na ściskanie betonu odpornego na destrukcję mrozową, MPa lub % R_{28} ,
 S_w - powierzchnia właściwa cementu, m^2/kg ,
V - objętość elementów konstrukcyjnych, m^3 ,
w/c - stosunek wodno-cementowy,
 α - współczynnik obliczeniowy funkcji „czas-temperatura”,
 μ - stopień nasycenia elementu konstrukcyjnego przez metal, %.



Rys. 1. Drzewo celów

II. Charakterystyki cieplno-fizyczne materiałów

- c_b - ciepło właściwe świeżego betonu, kJ/(kg K),
 c_i - ciepło właściwe kolejnych konstrukcyjnych i termoizolacyjnych warstw formy, kJ/(kg K),
 c_s - ciepło właściwe stali, kJ/(kg K),
 d_i - grubość kolejnych konstrukcyjnych i termoizolacyjnych warstw formy, m,
 d_{t4} - grubość warstwy termoizolacyjnej, m,
 w_i - wilgotność materiałowa kolejnych konstrukcyjnych i termoizolacyjnych warstw formy, %,
 γ_b - gęstość pozorna betonu, kg/m³,
 γ_i - gęstość pozorna kolejnych konstrukcyjnych i termoizolacyjnych warstw formy, kg/m³,
 γ_s - gęstość pozorna stali, kg/m³,
 λ_b - współczynnik przewodzenia ciepła świeżego betonu, W/(m K),
 λ_s - współczynnik przewodzenia ciepła stali, W/(m K),
 λ_i - współczynnik przewodzenia ciepła kolejnych konstrukcyjnych i termoizolacyjnych warstw formy, W/(m K).

III. Charakterystyki procesów technologicznych

- τ - czas osiągnięcia przez beton odporności na destrukcję mrozową, h,
 k_1 - współczynnik przenikania ciepła obliczany z uwzględnieniem ogrzania stali, W/(m² K),
 k_2 - współczynnik przenikania ciepła obliczany z uwzględnieniem procesu ogrzania stali i formy, W/(m² K),
 Q - nakłady energii cieplnej procesu twardnienia betonu elementu konstrukcyjnego, MJ/m³,
 Q_1 - ilość ciepła w świeżym betonie w chwili zagęszczania mieszanki betonowej, MJ/m³,
 Q_2 - ilość ciepła w betonie na skutek uwodnienia cementu, MJ/m³,
 Q_3 - ilość strat cieplnych na ogrzanie stali zbrojeniowej i wkładek montażowych, MJ/m³,
 Q_{t4} - ilość strat cieplnych na ogrzanie konstrukcji formy termoizolacyjnej, MJ/m³,
 q_{1m} - gęstość strumienia ciepłego po ogrzaniu stali zbrojeniowej, W/m²,
 q_{2m} - gęstość strumienia ciepłego po ogrzaniu stali zbrojeniowej i formy ocieplanej, W/m²,
 t_1 - temperatura uformowanego betonu mierzona po zagęszczaniu, °C,

- t_2 - temperatura betonu po ogrzaniu stali zbrojeniowej i wkładek montażowych, °C,
 t_3 - temperatura uformowanego betonu po ogrzaniu konstrukcji formy termoizolacyjnej, °C,
 t_5 - temperatura otoczenia (powietrza), °C,
 t_6 - temperatura twardniejącego betonu (średnia), °C,
 t_{z1} - temperatura mierzona na zewnętrznej powierzchni formy, °C,
 t_{z2} - temperatura obliczona na zewnętrznej powierzchni formy, °C,
 t_{z3} - średnia temperatura na zewnętrznej powierzchni formy, °C,
 t_{z4} - temperatura na zewnętrznej powierzchni formy sprawdzana i korygowana, °C,
 v - prędkość wiatru, m/s,
 α_k - współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję, W/(m² K),
 α_n - współczynnik przejmowania ciepła przez promieniowanie, W/(m² K),
 ΣQ - potencjał energetyczny procesu uzyskania przez beton odporności na destrukcję mrozową, MJ/m³,
 W - gradient skalarnego pola potencjału energetycznego, (MJ/m)/K,
 T_p - pracochłonność procesu produkcji i montażu formy ocieplanej, r-g/m³.

IV. Symbole stosowanych technologii procesów budowlanych

- T_{bz} - technologia betonowania zimowego,
 T_{tmb} - technologia transportu mieszanki betonowej,
 T_{wc} - technologia produkcji i przechowywania cementu,
 T_{wmb} - technologia wytwarzania mieszanki betonowej.

V. Pochodne parametry procesu tężenia mieszanki w temperaturach zimowych

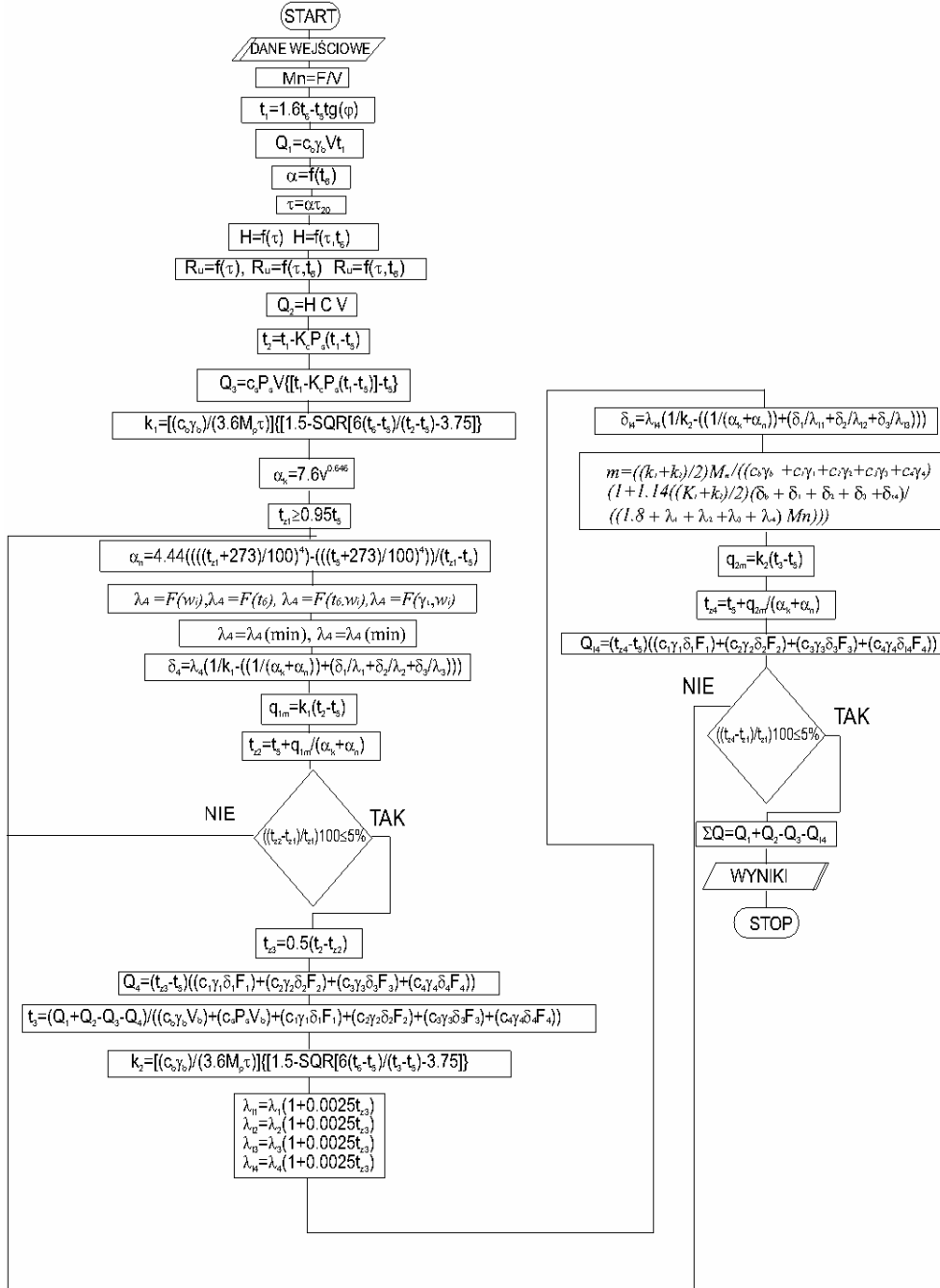
- dt_1/dt - szybkość stygnięcia elementu konstrukcyjnego, K/h,
 $\delta H/\delta \tau$ - szybkość procesu wydzielania ciepła hydratacji cementu, kJ/(kg h),
 $\delta^2 H/\delta^2 \tau$ - natężenie procesu wydzielania ciepła hydratacji cementu, (kJ/(kg h))/h,
 $\delta H/\delta t_6^2$ - szybkość zmiany ilości ciepła w procesie uwodnienia cementu, spowodowana zmianą temperatury o 1 K, kJ/(kg K),
 $\delta^2 H/\delta t_6^2$ - natężenie zmiany ilości ciepła w procesie uwodnienia cementu, spowodowane zmianą temperatury o 1°C, (kJ/(kg K))/K,

- $\delta Q_2/\delta \tau$ - szybkość procesu wydzielania ciepła uwodnienia cementu w betonie, MJ/(m³ h),
- $\delta^2 Q_2/\delta^2 \tau$ - przyspieszenie procesu wydzielania ciepła hydratacji cementu w betonie, (MJ/(m³ h))/h,
- $\delta Q_2/\delta t_6$ - szybkość zmiany ilości ciepła w procesie uwodnienia cementu, spowodowana wzrostem temperatury betonu o 1°C, MJ/(m³ K),
- $\delta^2 Q_2/\delta t_6^2$ - natężenie zmiany ilości ciepła w procesie uwodnienia cementu, spowodowane wzrostem temperatury betonu o 1°C, (MJ/(m³ K))/K.

VI. Parametry i wyznaczniki estymowanych modeli matematycznych

- $a_0, b_0, \dots, a_n, b_n$ - współczynniki regresji,
- d - dokładność wzoru, %,
- k_r - krzywizna linii w danym punkcie,
- k_{rs} - średnia krzywizna linii na rozpatrywanym odcinku,
- k_{rs}^p - średnia krzywizna linii w rozpatrywanym punkcie,
- k_{rs}^G - średnie wartości pełnej krzywizny Gaussa w rozpatrywanym punkcie,
- R - współczynnik korelacji,
- R^2 - współczynnik determinacji,
- R_{krs} - promień krzywizny,
- S_{ost} - resztkowa średniokwadratowa pozostałość,
- $\Sigma(y_i - \hat{y})^2$ - minimalna wartość sumy kwadratów różnic między wartościami z pomiarów i zaproksymowanymi,
- $[(y_i - \hat{y})/y_i] \cdot 100$ - procentowa odchyłka wartości danych z pomiarów od teoretycznych, %,
- y' - pierwsza pochodna funkcji celu,
- y'' - druga pochodna funkcji celu.

2. Algorytm modelowania wartości potencjału energetycznego



Rys. 2. Schemat blokowy algorytmu projektowania technologii energooszczędnych

3. Modelowanie typu i parametrów zależności potencjału energetycznego w procesie uzyskania przez beton odpowiedniej wytrzymałości w warunkach ujemnych temperatur otoczenia z uwzględnieniem masywności elementów konstrukcyjnych i stopnia ich nasycenia metalem

Typ zależności oraz wartości liczbowe potencjału energetycznego uzależnione są między innymi od relacji między temperaturą otoczenia a średnią temperaturą betonu w czasie twardnienia. Zauważyć można kilka kombinacji z nich wynikających, a mianowicie:

- temperatura otoczenia jest stała i temperatura twardniejącego betonu jest stała;
- temperatura otoczenia jest zmienna, a temperatura twardniejącego betonu jest stała;
- temperatura otoczenia jest zmienna i temperatura twardniejącego betonu jest zmienna;
- temperatura otoczenia jest stała, a temperatura twardniejącego betonu jest zmienna.

Zapewnienie uwarunkowań koniecznych do uzyskania przez beton projektowanej wytrzymałości polega na właściwym wyznaczeniu i utrzymaniu w okresie realizacji wymaganej wartości liczbowej średniej temperatury twardnienia betonu, w optymalnym zakresie czasu jego twardnienia. Średnia temperatura w czasie twardnienia betonu oraz odpowiednia izolacja termiczna zapewniają te warunki, utrzymując niezbędny potencjał energetyczny procesu uzyskania przez beton wymaganej wytrzymałości.

Wartości liczbowe potencjału energetycznego znajdują się w granicach przedziału mieszczącego się w obszarze wyznaczonym przez takie parametry elementu konstrukcyjnego, jak moduł powierzchniowy i stopień nasycenia przez metal. Przedział wartości liczbowych potencjału energetycznego procesu uzyskania przez beton odpowiedniej wytrzymałości w warunkach ujemnych temperatur otoczenia badanych niemasywnych elementów konstrukcyjnych mieści się między wartościami opisanymi warunkiem $[(t_{z2} - t_{z1})/t_{z1}] \cdot 100 \leq 5\%$ i $[(t_{z4} - t_{z1})/t_{z1}] \cdot 100 \leq 5\%$.

W dalszej części artykułu graniczne wartości liczbowe oznaczane są jako maksymalne z dopuszczalnych, minimalne z możliwych i średnie, wyznaczone przez funkcję $\Sigma Q = F(t_5, t_6)$.

Badanie uwarunkowań temperaturowych betonu niemasywnych elementów konstrukcyjnych o $M_p = 6 \div 12 \text{ m}^{-1}$ i stopniu nasycenia przez metal $\mu = 0,0127 \div 6,3694\%$ z betonu klasy C16/20 na CP40 o $C = 330 \text{ kg/m}^3$ i $w/c = 0,59$ w procesie uzyskania wytrzymałości w warunkach ujemnych temperatur otoczenia stanowiło podstawę do obliczania minimalnych wartości liczbowych potencjału energetycznego, zamieszczonych w tabeli 1.

W określanych granicach wartości liczbowych modułu powierzchniowego i stopnia nasycenia elementu konstrukcyjnego metalem badane wartości potencjału energetycznego odróżniają się od siebie o 7,2%. Potencjał energetyczny zmniejsza się wraz ze zwiększaniem wartości modułu powierzchniowego i stopnia nasycenia

elementu konstrukcyjnego metalem. Ilość doświadczeń, gdzie odchylenie przekracza pięcioprocentowy próg, wynosi 20%. Warto przypomnieć tu, że za dopuszczalne odchylenie pomiarów temperatury betonu uważamy 5%. Fakt ten świadczy o zależności potencjału energetycznego od wartości liczbowej modułu powierzchniowego oraz o tym, że potencjał energetyczny określany zależnością $\Sigma Q = F(M_p, \mu)$ nie jest wartością stałą (tabele 2-5 i rysunek 3).

Zwiększenie zawartości stali zbrojeniowej w elemencie konstrukcyjnym obniża wartość liczbową potencjału energetycznego, nie przekraczając pięcioprocentowego progu odchyłki dopuszczalnej, lecz ujawnia tendencję ku zmniejszaniu jego wartości liczbowej. W tym przypadku do obliczeń inżynierskich można stosować średnie wartości potencjału energetycznego.

Aproksymację danych doświadczalnych na podstawie metody najmniejszych kwadratów, algorytmu i programu komputerowego, opracowanego przez autora, wykonano, posługując się równaniem płaszczyzny

$$z = b_0 + b_1x + b_2y \tag{1}$$

gdzie:

$x \leftrightarrow M_p$ - moduł powierzchniowy elementu konstrukcyjnego, m^{-1} ,

$y \leftrightarrow \mu$ - stopień nasycenia elementu konstrukcyjnego przez metal, %,

$z \leftrightarrow \Sigma Q$ - potencjał energetyczny procesu, MJ/m^3 .

TABELA 1

**Potencjał energetyczny $\Sigma Q(\min) = F(M_p, \mu)$ - założenia: $t_5 = -5^\circ C$; $t_6 = 1^\circ C$
(wartości doświadczalne)**

$\mu, \%$	Moduł powierzchniowy M_p, m^{-1}					
	6	8	10	12	14	16
0,0127	59,114	58,639	58,122	57,548	56,896	56,153
0,6369	58,905	58,431	57,912	57,333	56,67	55,887
1,2738	58,691	58,217	57,697	57,112	56,438	55,632
1,9108	58,48	58,007	57,484	56,894	56,207	55,376
2,5478	58,273	57,799	57,274	56,677	55,975	55,116
3,1847	58,069	57,595	57,067	56,461	55,743	54,851
3,8217	57,868	57,394	56,862	56,248	55,511	
6,3694	57,096	56,615	56,062	55,398		

Algorytm obliczeniowy stanowi sposób aproksymacji danych doświadczalnych i daje odpowiedź na zasadnicze pytanie, czy wszystkie wartości liczbowe potencjału energetycznego leżą na płaszczyźnie, określanej przez funkcję aproksymującą.

Wartości liczbowe parametrów uwzględnionych we wzorze na współczynniki regresji i wyznaczniki przydatności funkcji przedstawiono w pracy [1].

TABELA 2

**Potencjał energetyczny $\Sigma Q(\dot{s}r) = F(M_p, \mu)$ - założenia: $t_5 = -16 \pm -17^\circ\text{C}$; $t_6 = 1 \pm 12^\circ\text{C}$
(wartości doświadczalne)**

$\mu, \%$	Moduł powierzchniowy M_p, m^{-1}					
	6	8	10	12	14	16
0,0127	77,667	78,018	77,503	77,424	76,576	74,956
0,6369	79,925	80,273	79,885	78,781	77,756	75,657
1,2738	80,422	80,535	79,95	78,945	78,088	75,587
1,9108	80,413	80,958	80,957	78,467	77,299	76,203
2,5478	80,694	80,247	79,411	78,786	77,822	75,098
3,1847	80,333	80,458	78,963	78,12	77,31	75,398
3,8217	80,444	80,571	79,324	78,633	76,293	
6,3694	78,677	78,39	78,154	76,967		

TABELA 3

**Potencjał energetyczny $\Sigma Q(\dot{s}r) = F(M_p, \mu)$ - założenia: $t_5 = -16 \pm -17^\circ\text{C}$; $t_6 = 1 \pm 12^\circ\text{C}$
(wartości zaproksymowane funkcją:
 $\Sigma Q(\dot{s}r) = 75,705 + 0,666 M_p + 2,274 \mu - 0,059 M_p^2 - 0,416 \mu^2$)**

$\mu, \%$	Moduł powierzchniowy M_p, m^{-1}					
	6	8	10	12	14	16
0,0127	77,606	77,286	76,494	75,23	73,494	71,276
0,6369	78,557	78,537	77,745	76,481	74,745	72,537
1,2738	79,799	79,479	78,687	77,424	75,687	73,479
1,9108	80,403	80,083	79,291	78,027	76,291	74,083
2,5478	80,671	80,35	79,558	78,294	76,558	74,35
3,1847	80,6	80,28	49,488	78,224	76,488	74,28
3,8217	80,192	79,872	79,08	77,816	76,08	
6,3694	75,184	74,864	74,072	72,807		

TABELA 4

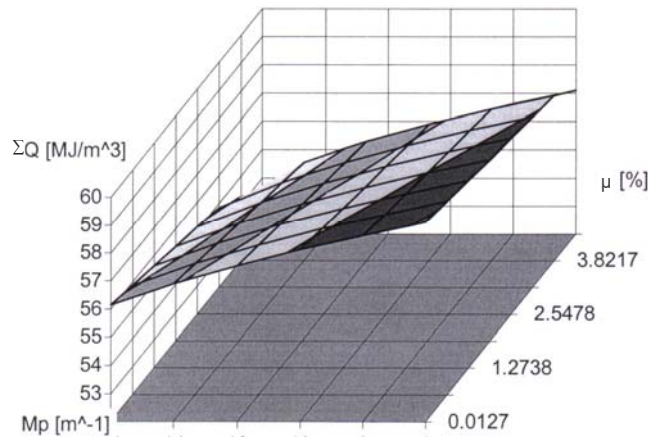
**Potencjał energetyczny $\Sigma Q(\text{max}) = F(M_p, \mu)$ - założenia: $t_5 = -20^\circ\text{C}$; $t_6 = 1 \pm 12^\circ\text{C}$
(wartości doświadczalne)**

$\mu, \%$	Moduł powierzchniowy M_p, m^{-1}					
	6	8	10	12	14	16
0,0127	86,01	87,953	89,617	90,95	91,87	88,794
0,6369	88,795	94,52	96,018	93,609	94,392	94,577
1,2738	91,853	93,606	95,068	96,174	96,816	93,404
1,9108	94,674	96,333	97,692	98,652	95,737	95,568
2,5478	93,781	95,41	96,73	97,661	98,057	94,31
3,1847	96,528	98,063	99,279	96,646	96,934	96,297
3,8217	95,633	97,135	98,308	99,044	95,803	
6,3694	95,651	96,952	97,849	98,14		

TABELA 5

Potencjał energetyczny $\Sigma Q(\max) = F(M_p, \mu)$ - założenia: $t_5 = -25^\circ\text{C}$; $t_6 = 1+12^\circ\text{C}$
(wartości doświadczalne)

$\mu, \%$	Moduł powierzchniowy M_p, m^{-1}					
	6	8	10	12	14	16
0,0127	92,442	94,004	95,268	96,18	96,66	96,577
0,6369	98,997	100,405	101,512	102,26	102,557	98,785
1,2738	101,662	102,981	103,993	104,636	104,804	100,879
1,9108	100,583	105,504	106,422	103,441	103,527	102,896
2,5478	103,178	104,38	105,26	105,739	105,681	101,452
3,1847	102,099	103,272	104,112	104,531	104,369	103,32
3,8217	104,631	105,715	106,457	106,755	106,423	
6,3694	100,425	104,788	105,271	105,158		



Rys. 3. Potencjał energetyczny minimalny z możliwych (dane z tabeli 5)

Ujemne znaki przy wartościach liczbowych b_1 i b_2 wskazują na obniżenie potencjału energetycznego w wyniku powiększania wartości liczbowych modułu powierzchniowego i stopnia nasycenia elementu konstrukcyjnego przez metal. Płaszczyzna aproksymująca jest pochylona w stosunku do osi X pod kątem równym $16,5^\circ$, do osi Y pod kątem równym $16,2^\circ$. Prędkość zmiany potencjału energetycznego w stosunku do obu osi jest praktycznie jednakowa i wynosi $0,296 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \text{ K})$ i $0,291 \text{ MJ}/(\text{m}^3 \text{ K})$.

Ekstremalne wartości liczbowe potencjału energetycznego położone na powierzchni aproksymującej odpowiadają punktom o następujących wartościach liczbowych współrzędnych (6; 0,0127; 54,851) i (16; 3,1847; 54,851), zamieszczonych w pracy [1]. Maksymalna wartość liczbową procentowej odchyłki danych doświadczalnych od zaproksymowanych wynosi 0,69%.

Przydatność modelu matematycznego została zapewniona przez małą wartość liczbową resztkowej średniokwadratowej odchyłki, dużą wartość liczbową współczynnika korelacji i wysoki stopień dokładności wzoru.

Obliczanie średnich wartości liczbowych potencjału energetycznego prowadzono na podstawie badań eksperymentalnych nad uwarunkowaniami temperaturowymi procesu uzyskania wytrzymałości równej $40\%R_{28}$ przez beton elementów konstrukcyjnych o identycznych charakterystykach materiałowo-konstrukcyjnych.

Badania prowadzono w temperaturze otoczenia równej $-16\div-17^{\circ}\text{C}$, w przedziale czasowym $104\div125$ h. Początkowa temperatura betonu była równa od 12 do 19°C . Średnia temperatura twardniejącego betonu wynosiła od $1,8$ do $5,2^{\circ}\text{C}$. Wartość współczynnika przenikania ciepła formy ocieplanej w zależności od wartości modułu powierzchniowego elementu konstrukcyjnego była zmieniana od $0,826$ do $0,156$ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$. Uzyskana wytrzymałość betonu na ściskanie w każdym elemencie konstrukcyjnym wyniosła ponad $40\%R_{28}$.

Rozkład średnich wartości liczbowych potencjału energetycznego został przedstawiony w tabelach 6 i 7 oraz modelu graficznym (rys. 2).

Oczywisty staje się fakt zwiększenia potencjału energetycznego procesu uzyskania przez beton wytrzymałości mrozowej w środku pola potencjału określanego przez funkcję $\Sigma Q = F(M_p, \mu)$. Obszar powierzchni pola potencjału energetycznego o podwyższonych wartościach liczbowych znajduje się w następujących współrzędnych: $M_p = 6\div10$ m^{-1} i $\mu = 1,9108\div3,1847\%$. Na tym obszarze leży ekstremalna wartość liczbowa potencjału energetycznego. Obniżone wartości liczbowe potencjału energetycznego położone są w obwodowym obszarze pola potencjału energetycznego. Kształt powierzchni pola potencjału energetycznego przypomina w tym przypadku, umownie określając, „kształt żagla napiętego”.

Na powłokowy kształt powierzchni pola potencjału energetycznego składają się następujące czynniki:

- początkowa temperatura betonu stosunkowo niewysoka, lecz wystarczająca dla zapewnienia projektowanej wytrzymałości przez beton elementów konstrukcyjnych niezbrojonych;
- zwiększenie intensywności odpływu ciepła na ogrzanie stali zbrojeniowej w miarę powiększania ilości ostatniej;
- zwiększenie intensywności odpływu ciepła na ogrzanie elementów konstrukcyjnych formy ocieplanej w miarę powiększania wartości liczbowej modułu powierzchniowego.

W określanych granicach wartości liczbowych modułu powierzchniowego i stopnia nasycenia elementu konstrukcyjnego przez metal badane wartości potencjału energetycznego odróżniają się od siebie o blisko 8%. Udział badań, gdzie odchylenie przekracza pięcioprocentowy próg, wynosi 17,8%.

Do analizy zależności rozkładu średnich wartości liczbowych, określanых przez funkcję $\Sigma Q = F(M_p, \mu)$, stosowano metodę rotatabilnego planowania eksperymentu drugiego stopnia [1].

Wielomian drugiego stopnia

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 \quad (2)$$

gdzie: $x_1 \leftrightarrow M_p$ [m^{-1}]; $x_2 \leftrightarrow \mu$ [%]; $y \leftrightarrow \Sigma Q$ [MJ/m^3]

stanowi adekwatny model matematyczny, określający wyżej wymienioną zależność.

Sposób kodowania wartości liczbowych argumentów został przedstawiony w tabeli 6.

TABELA 6

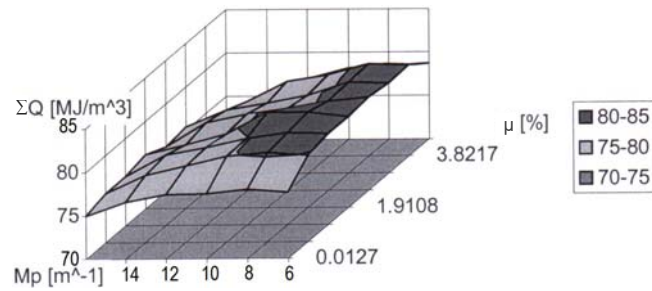
Kodowanie i przedziały zmienności czynników zależności $\Sigma Q = F(M_p, \mu)$

Lp.	Czynniki	Poziomy zmienności					Wariancja w
		-1,414	-1	0	+1	+1,414	
1	M_p - moduł powierzchniowy, m^{-1} [x_1]	6	8	11	14	16	3
2	μ - stopień zbrojenia, % [x_2]	0,013	1,885	3,191	4,497	6,369	1,306

TABELA 7

Planowanie i wyniki badania zależności $\Sigma Q = F(M_p, \mu)$

Lp.	Macierze				Wyniki doświadczeń					
					Wartości potencjału energetycznego ΣQ , MJ/m^3					
					Warianty temperatury w zakresie $t_6 = 1 \div 25^\circ C$					
	Planowania		Robocza		I		II		III	
	X_1	X_2	M_p	μ	$t_5 = -16 \div -17^\circ C$		$t_5 = -20^\circ C$		$t_5 = -25^\circ C$	
		m^{-1}	%	Y_1	Y_2	Y_1	Y_2	Y_1	Y_2	
1	+	+	14	4,497	75,30	75,50	96,31	96,32	104,79	104,81
2	-	+	8	4,497	79,00	79,20	97,41	97,42	105,00	105,03
3	+	-	14	1,885	76,20	76,40	94,84	94,85	101,05	101,06
4	-	-	8	1,885	79,90	81,10	93,74	93,75	99,98	99,99
5	-1,414	+	6	3,191	80,40	80,60	96,43	96,44	104,09	104,011
6	+1,414	+	16	3,191	75,10	75,30	96,48	96,49	104,71	104,73
7	0	-1,414	11	0,013	78,00	78,20	92,91	92,92	97,92	97,93
8	0	+1,414	11	6,369	76,80	77,00	96,55	96,65	104,12	104,13
9	0	0	11	3,191	79,00	79,20	99,29	99,30	107,00	107,10
10	0	0	11	3,191	78,85	78,95	99,19	99,20	106,70	106,80
11	0	0	11	3,191	78,64	78,66	99,39	99,40	106,60	106,70
12	0	0	11	3,191	78,69	78,71	99,20	99,10	106,90	107,00
13	0	0	11	3,191	78,84	78,86	99,10	99,00	106,50	106,70



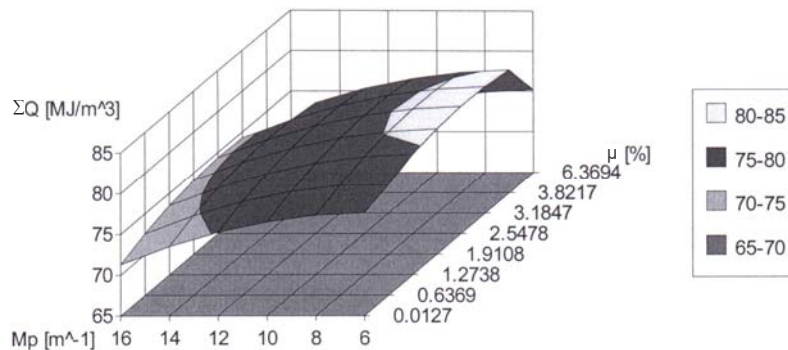
Rys. 4. Potencjał energetyczny o wartościach średnich (tab. 7)

Macierz planowania oraz związana z nią macierz robocza, niezbędne do określania typu zależności $\Sigma Q = F(M_p, \mu)$, współczynników regresji oraz doświadczalne wartości liczbowe przedstawiają tabele 6 i 7.

Badania nad temperaturą twardniejącego betonu, stanowiące podstawę do określania wartości liczbowych potencjału energetycznego zostały powtórzone trzykrotnie (tab. 7).

Uzupełniające wartości liczbowe potencjału energetycznego procesu uzyskania wytrzymałości betonu w warunkach ujemnych temperatur otoczenia w żelbetowym monolitycznym nadprożu o $M_p = 6, 8, 11, 14, 16 \text{ m}^{-1}$ uzyskane zostały przez eksperymentalne badania temperatury twardniejącego betonu.

Parametry technologiczne, ograniczające zakres stosowania funkcji aproksymującej, współczynniki regresji i wyznaczniki przydatności ostatniej opisano w pracy [1]. Model graficzny zależności $\Sigma Q = F(M_p, \mu)$ zaproksymowanej wielomianem drugiego stopnia przedstawia rysunek 5.



Rys. 5. Potencjały energetyczne o wartościach średnich (dane w tabeli 7)

Procentowa odchyłka zaproksymowanych wartości liczbowych potencjału energetycznego w stosunku do wartości liczbowych doświadczalnych (tab. 2 i 3) wynosi od 1,08 do 5,4%.

Adekwatność modelu matematycznego jest gwarantowana przez obliczane wartości liczbowe współczynnika Fiszer'a mniejsze od normowych, małe wartości licz-

bowe resztkowej średniokwadratowej odchyłki, dużą wartość liczbową współczynnika korelacji. Według umownej skali podziału wielkości krzywizny, proponowanej przez autora, krzywiznę funkcji zaproksymowanej uważa się za „krzywiznę dużą” [1].

Uzasadnieniu propozycji autorskiej w dużym stopniu służy adekwatność oraz sprawdzona przydatność opracowanego modelu matematycznego i brak urządzeń do bezpośredniego pomiaru wartości potencjału energetycznego betonowych elementów konstrukcyjnych o różnym kształcie i dużej skali wartości liczbowych modułu powierzchniowego.

Optymalizacja potencjału energetycznego polega na określaniu pierwszych cząstkowych pochodnych $\partial y/\partial x_1$ i $\partial y/\partial x_2$, przyrównaniu ostatnich do zera i rozwiązaniu układu równań

$$\begin{aligned} b_1 + b_{12}x_2 + 2b_{11}x_1 &= 0 \\ b_2 + b_{12}x_1 + 2b_{22}x_2 &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Po podstawieniu uzyskanych wartości liczbowych do równań uzyskuje się ekstremalną wartość potencjału energetycznego. W przypadku omawianego modelu matematycznego wartość ta oczywiście będzie maksymalna, a ekstremalny punkt obszaru pola potencjału zdefiniowany przez współrzędne (6; 2,733; 80,68), gdzie: $M_p = 6 \text{ m}^{-1}$; $\mu = 2,733\%$, co jest równe 215 kg/m^3 stali w jednym metrze sześciennym betonu elementu konstrukcyjnego; $\Sigma Q = 80,68 \text{ MJ/m}^3$.

Określanie maksymalnych wartości liczbowych potencjału energetycznego prowadzono na podstawie badań eksperymentalnych nad uwarunkowaniami temperaturowymi procesu uzyskania wytrzymałości $40\%R_{28}$ przez beton elementów konstrukcyjnych o identycznych charakterystykach materiałowo-konstrukcyjnych.

Badania prowadzono na fragmentach elementów konstrukcyjnych w temperaturze otoczenia równej -20 i -25°C w przedziale czasowym $70 \div 131$ h. Początkowa temperatura betonu w temperaturze otoczenia -20°C wynosiła $31,2$ i $13,6^\circ\text{C}$ i obniżała się do 0°C . Średnia temperatura twardniejącego betonu wynosiła od 12 do 1°C . Beton fragmentów konstrukcyjnych monolitycznych, dojrzewający w temperaturze otoczenia równej -25°C , miał temperaturę początkową $34,2$ i $16,6^\circ\text{C}$. W czasie uzyskania wytrzymałości mrozo odpornej ostatnia obniżała się do 1°C . Średnia temperatura twardniejącego betonu wynosiła od 12 do 1°C .

Współczynnik przenikania ciepła formy ocieplanej w zależności od wartości modułu powierzchniowego elementu konstrukcyjnego przyjmował wartość od $0,924$ do $0,059 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Uzyskana wytrzymałość betonu na ściskanie we fragmentach elementów konstrukcyjnych wyniosła ponad $40\%R_{28}$.

Rozkład średnich wartości liczbowych potencjału energetycznego został przedstawiony w tabelach 2 i 3.

Do planowania parametrów zależności $\Sigma Q = F(M_p, \mu)$, określenia typu funkcji, przedziałów zmienności czynników, współczynników funkcji regresji i wyznaczników przydatności funkcji zastosowano metodę rotatabilnego planowania eksperymentu drugiego stopnia. Parametry technologiczne, ograniczające zakres stosowa-

nia funkcji aproksymującej, współczynniki regresji i wyznaczniki przydatności ostatniej omówiono w pracy [1].

Ekstremalna wartość liczbowa potencjału energetycznego betonu elementu konstrukcyjnego, dojrzewającego w temperaturze otoczenia -20 i -25°C , wynosi odpowiednio $99,30$ i $103,52$ MJ/m³.

W przypadku omawianych założeń wartości te będą maksymalne, a ekstremalne punkty obszaru pola potencjału procesu dojrzewania betonu w temperaturach otoczenia -20 i -25°C można zdefiniować odpowiednio przez współrzędne $(10,86; 3,559; 99,30)$ i $(10,75; 5,079; 103,52)$, gdzie: $M_p = 10,86$ i $10,75$ m⁻¹; $\mu = 3,559$ i $5,079\%$, co jest równe 280 i 400 kg/m³ stali w jednym metrze sześciennym betonu elementu konstrukcyjnego; $\Sigma Q = 99,3$ i $103,52$ MJ/m³.

Wnioski

Modelowanie i optymalizacja współzależności czynników natury materiałowo-konstrukcyjnej, technologicznej i wpływu klimatu w podejmowanych rozwiązaniach inżynierskich stwarza możliwości pewnego *prognozowania trendu funkcji celu (budowania wektora wartości funkcji celu)*, konieczne dla zmniejszania energochłonności i przez to obniżania cen rozwiązań technologicznych obecnych na rynku budowlanym.

Modelowanie w aspekcie analizy i prognozowania tendencji zmian wartości potencjału energetycznego cieplnego w procesie uzyskania wytrzymałości betonu w zmiennych zimowych warunkach klimatu umiarkowanego pozwala zaoszczędzić nakłady oraz obniżyć straty energii cieplnej i związane z nimi koszty.

Opracowane zostały technologiczne i organizacyjne uwarunkowania procesu uzyskania odpowiedniej wytrzymałości betonu w temperaturach zimowych przy *minimalnym nakładzie energii*.

Literatura

- [1] Bobko T.F., Optymalizacja potencjału energetycznego tężenia mieszanki w aspekcie zapewnienia wymaganej mrozoodporności betonu i elementów konstrukcyjnych. Wyniki badań. Podstawy modelowania i prognozowania, Monografia 47. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 1997.

Streszczenie

Omówiono problem zbadania uwarunkowań ciepłno-fizycznych procesu uzyskania odpowiedniej wytrzymałości betonowych elementów konstrukcyjnych w temperaturach obniżonych i zimowych, przy optymalnym zużyciu energii i dotrzymaniu tych uwarunkowań do czasu uzyskania projektowanej wytrzymałości. Zaproponowany model i procedura analizy czynników wpływających na kształtowanie się wytrzymałości elementów betonowych w warunkach oddziaływania ujemnych temperatur

otoczenia pozwalają dobrać sposób na uzyskanie optymalnej wytrzymałości przy zminimalizowanym zapotrzebowaniu na energię i minimalnych kosztach.

Modelling thermal and physical conditionality of step engineering in concrete structural components

Abstract

The paper concerns the problem of thermal and other physics examine the circumstances of the process of obtaining adequate strength concrete structural components in reduced and winter temperatures, with an optimal energy consumption, and keep those conditions until the proposed strength. The proposed model and procedure for the analysis of factors affecting the evolution of the strength of the concrete elements in the conditions of the impact of negative ambient temperatures, allows selected a solution to achieve optimal strength when minimal energy demand and minimal costs.