

Możliwość oszacowania wytrzymałości betonu na ściskanie za pomocą funkcji dojrzałości

The possibility of estimation of concrete compressive strength based on the maturity function

1. Wprowadzenie

Poprawne oszacowanie wczesnej wytrzymałości betonu na ściskanie jest ważne w polskich warunkach klimatycznych, szczególnie w okresie jesienno-zimowym. Ocena wytrzymałości na próbkach przechowywanych obok konstrukcji [podobnie osłonięte i pielęgnowane] może nie być miarodajna (5, 6) ze względu na znacznie mniejsze ich wymiary. Ulęgną one szybszemu ochłodzeniu, a w pewnych przypadkach nawet zamarznięciu. Wytyczne ITB (4) pozwalają na oszacowanie wytrzymałości betonu w stosunku do jego wczesnej wytrzymałości po 28 dniach, dojrzewającego w temperaturze 20°C, w zależności od rodzaju cementu oraz średniej temperatury dobowej w zakresie 0÷30°C. Potrzebne dane tabelaryczne pochodzą z normy PN – 75/B – 06250 Beton zwykły. Od lat siedemdziesiątych zaszły bardzo duże zmiany w technologii produkcji cementów, ich właściwościach, jak i jakości stosowanych domieszek do betonu. Praktyczna przydatność danych zamieszczonych w wytycznych ITB (4) może więc być wątpliwa.

Metody oparte na wytrzymałości betonu po 28 dniach, a więc wykorzystujące właściwości dojrzałego kompozytu, są od kilku dekad stosowane do prognozowania rozwoju wytrzymałości betonu na ściskanie, na podstawie historii zmian jego temperatury w trakcie dojrzewania. Najbardziej popularne koncepcje „dojrzałości” wyróżniają się dużą prostotą oraz niezłą korelacją wytrzymałości ze stopniem hydratacji cementu. Przyjmuje się, analogicznie do reakcji zachodzących w gazach i w roztworach, że szybkość hydratacji cementu zależy od temperatury i spełnia prawo Arrheniusa: $Q = a \cdot f(\alpha) \cdot \exp(-E/(RT))$ (3). Liczne badania doświadczalne wykazują, że szybkość wydzielania ciepła hydratacji wzrasta z temperaturą, co świadczy równocześnie o wzroście szybkości reakcji cementu z wodą. Współczynniki równania Arrheniusa można oszacować na podstawie pomiarów ciepła hydratacji w adiabatycznym kalorymtrze, lub obliczyć na podstawie modeli Hemostruc czy CHEMY 3D, zamieszczonych w Internecie.

Metoda ekwiwalentnego czasu dojrzewania (wzór H-P Hansena-Pedersena) pozwala obliczyć szybkość procesu twardnienia w zależności od czasu i temperatury dojrzewania betonu [1]:

1. Introduction

Correct estimation of initial concrete compressive strength is important in Polish climatic conditions, especially in the autumn-winter period. The strength evaluation of samples stored next to the construction [similarly exposed and cured] due to their significantly smaller dimensions may not be reliable (5, 6). The samples cool down faster and in some cases they even freeze. The ITB recommendations (4) allow to estimate the concrete strength in relation to its 28 days strength, maturing at 20°C and depending on cement type as well as average daily temperature in the range of 0÷30°C. Required tabular data are included in PN – 75/B – 06250 ordinary standard. However, since 1970 the production technology of cements as well as cements properties and a quality of admixtures for concrete have been significantly changed. Thus practical usefulness of the data included in the ITB recommendations (4) may be doubtful.

The methods based on concrete strength after 28 days, i.e. using properties of the mature composite, have been used for several decades to predict the development of concrete compressive strength, based on the history of its temperature changes during maturing. The most popular conceptions of “maturity” are characterized by great simplicity and good correlation between strength and the hydration degree of cement. It is considered that, similarly to reaction taking place in the gases and in the solutions, the rate of cement hydration depends on temperature and obeys the Arrhenius law: $Q = a \cdot f(\alpha) \cdot \exp(-E/(RT))$ (3). Several researches indicate that the rate of hydration heat evolution increases with temperature, what at the same time means that the rate of cement reaction with water is increasing too. The coefficients of Arrhenius equation can be estimated based on the measurements of heat of hydration in the adiabatic calorimeter or computed using the Hemostruc or CHEMY 3D models available in Internet.

The method of equivalent maturing time (Hansen-Pedersen (H-P) equation) allows to calculate the rate of hardening process depending on time and temperature of concrete maturing [1]:

$$t_e = \frac{E_a}{R} \cdot \Sigma \exp \left[- \left(\frac{T_0 - T}{T_0} \right) \right] \quad [1]$$

gdzie:

E_a – aktywność hydrauliczna cementu (energia aktywacji procesu),

R – stała gazowa wynosząca 8,3144 J/mol·K,

T – temperatura, K,

T_0 – temperatura porównawcza, K.

Wzór H-P zawiera tylko jeden parametr E_a nazywany energią aktywacji cementu, który wyrażany jest w jednostkach J/mol. Zdaniem niektórych badaczy (m.in. prof. Kurdowskiego) nazewnictwo takie nie jest poprawne, gdyż trudno jest mówić o energii aktywacji, czy o „molu” wielofazowego materiału, jakim jest cement. Roy i Dorn (7) stwierdzają, że hydratacja cementu jako materiału wielofazowego nie jest prostą reakcją dwóch związków i dlatego pojęcie „energia aktywacji” nie jest ściśle. W tym przypadku można mówić tylko o pewnej analogii do jednej reakcji, którą ujmuje formuła Arrheniusa. Bardziej poprawne byłoby określenie, podobnie jak w przypadku popiołu lotnego, „współczynnik aktywności hydraulicznej” cementu ujmujący łącznie parametr E_a/R . Carino i Tank (3) zaproponowali uproszczoną postać zależności $t_e = \Sigma \exp(B(T-T_0))$, gdzie B oznacza współczynnik aktywności termicznej cementu [1/°C].

Uniwersalność funkcji dojrzałości wymaga, aby wartość E_a/R była niezależna od temperatury, co jak wiadomo nie jest spełnione. Dane doświadczalne wykazują, że E_a zależy również od innych czynników, a przede wszystkim od składu i wytrzymałości betonu na ściskanie. W praktyce budowlanej spotyka się czasami sytuacje, w których nie można zastosować dostępnych w handlu mierników dojrzałości betonu, ponieważ przyjęcie wartości współczynnika E_a z tablic dla badanego betonu nie zapewnia poprawnej zależności wytrzymałości od rzeczywistych zmian jego temperatury w czasie dojrzewania. W związku z tym Zhang i in. (9) postulują aby zamiast poszukiwać uniwersalnej wartości współczynnika E_a wyznaczać jego wartość z danych statystycznych, dotyczących korelacji wytrzymałość - czas twardnienia [dojrzałość].

W artykule przedstawiono wyniki oznaczeń współczynników aktywności hydraulicznej ośmiu produkowanych w Polsce cementów, wykorzystując metodę podaną w normie ASTM C1074. Porównano oznaczoną wytrzymałość betonu dojrzewającego w różnych temperaturach z wynikami obliczonymi za pomocą 3 różnych funkcji dojrzałości.

2. Materiały i metody

Badania obejmowały dwa etapy:

W etapie I przeprowadzono badania zapraw wykonanych z 8 różnych cementów w celu wyznaczenia współczynników aktywności hydraulicznej cementów.

W etapie II sprawdzono poprawność oszacowanych wytrzymałości na ściskanie za pomocą 3 różnych zależności funkcyjnych, dla dwóch serii betonów dojrzewających w temperaturach 5, 20, 35°C.

$$t_e = \frac{E_a}{R} \cdot \Sigma \exp \left[- \left(\frac{T_0 - T}{T_0} \right) \right] \quad [1]$$

where:

E_a – hydraulic activity of cement (process activation energy),

R – universal gas constant 8,3144 J/mol ·K,

T – temperature, K,

T_0 – comparative temperature, K.

The H-P equation contains only one parameter E_a called activation energy of cement, which is expressed in J/mol units. Some researchers (prof. Kurdowski among others) think, however, that such designation is not correct, because it is hard to say about activation energy or mole of such multiphase material as Portland cement. Roy and Dorn (7) state that hydration of cement as a multiphase material is not a simple reaction of two compounds, therefore the term “activation energy” is not accurate. In that particular case it could be only some analogy to a reaction, which is included in the Arrhenius formula. A more correct term would be then, similarly to the case of fly ash, “hydraulic activity index” of cement, covering together E_a/R parameter. Carino and Tank (3) proposed simplified version of relationship $t_e = \Sigma \exp(B(T-T_0))$, where B stands for the index of cement thermal activity [1/°C].

Universality of maturity function requires that E_a/R value should be temperature independent, while as it is known that it is not met. Additionally, experimental data indicate that E_a also depends on other factors, primarily on composition and compressive strength of concrete. There are sometimes situations in the construction practice, where commercially available concrete maturity measuring devices cannot be used, because adopting the E_a from tables for examined concrete does not ensure correct relationship between the strength and real changes of concrete temperature over maturing time. Therefore Zhang et al. (9) postulate to determine E_a index from statistical data concerning the correlation between strength and hardening time [maturity], instead of searching for its universal value.

In the paper the results, obtained according to method given in ASTM C 1074 standard, of hydraulic activity indexes of 8 cements produced in Poland were presented. The measured strength of concrete maturing at different temperatures was compared with the results calculated according to 3 different maturity functions.

2. Materials and methods

The investigation covered the following two stages:

In the first stage examinations of mortars made of 8 different cements were performed to determine the hydraulic activity indexes of cements.

In the second stage correctness of estimated compressive strength results was verified by 3 different functions, for two concrete series matured at 5, 20 and 35°C.

Badania dotyczyły betonu klasy C25/30 o stosunku w/c = 0,50, którego skład podano w tablicy 1.

The tests concerned concrete of C25/30 class and w/c = 0.50, which composition was given in Table 1.

Badania zapraw przeprowadzono zgodnie z normą ASTM C 1074. Zakres badań obejmował wykonanie 8 serii zapraw, każdej złożonej z 18 próbek o wymiarach 4x4x16 cm. W badaniach zastosowano 6 różnych cementów oraz dwa spoiwa otrzymane ze zmieszania cementu (N42) ze zmielonym granulowanym żużlem wielkopieczowym w ilości 20% i 50%. Skład zaprawy (tablica 3) wyznaczono przyjmując stosunek piasku do cementu taki sam jak stosunek kruszywa grubego do cementu w betonie.

Examinations of mortars were performed according to ASTM C 1074 standard. Scope of the research covered production of 8 mortar

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD BETONU, kg/m³

COMPOSITION OF CONCRETE, kg/m³

Składnik/Component	Ilość/Quantity
Cement	350
Piasek/Sand 0-2 mm	658
Kruszywo/Aggregate 4/8 mm	698
Kruszywo/Aggregate 8/16mm	698
Woda/Water	175

Badania przeprowadzone w II etapie obejmowały wykonanie z betonu 14 kostek o boku 10 cm z cementu CEM I 42,5R (N42) i kruszywa dolomitowego.

Tablica 2 / Table 2

PODSTAWOWE WŁAŚCIWOŚCI CEMENTÓW I ŻUŻLA

PROPERTIES OF CEMENTS AND BLAST FURNACE SLAG

Symbol	Rodzaj cementu Cement type	Skład chemiczny / Chemical composition, %					Blaine m ² /kg	Wytrzymałość / Strength, MPa	
		SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃		R ₂	R ₂₈
O	CEM I 32,5R	21,5	64,4	1,80	2,15	5,00	325	21,1	48,7
N32	CEM I 32,5R	19,63	63,3	2,09	2,68	4,66	332	26,4	48,6
W	CEM I 42,5R	20,34	64,34	0,78	2,68	4,8	353	25,3	59,0
N42	CEM I 42,5R	19,84	63,2	2,08	2,72	4,65	409	32,0	53,0
N-V	CEM II B-V 32,5R	30,52	43,9	2,18	3,92	11,91	384	18,8	43,7
O-V	CEM II B- V 32,5R	26,8	50	2,08	3,5	9,7	456	20,1	49,0
Żużel / Slag	-	40,1	44,8	5,9	0,3	7,0	445	-	-

Prowadzono równolegle badania zapraw i betonu, przy czym próbki bezpośrednio po zaformowaniu dojrzewały przez 28 dni w komorach klimatycznych, w wodzie o stałej temperaturze. Wybrano trzy temperatury, które wynosiły: 5°C, 20°C i 35°C. Wytrzymałość na ściskanie zmierzono po 12 h oraz po 1, 2, 4, 7, 14 i 28 dniach dojrzewania.

tars series, each including 18 samples of dimensions of 4x4x16 cm. 6 different Portland cements and 2 binders obtained by blending of Portland cement (N42) with granulated blastfurnace slag in the quantity of 20% and 50% were used in these investigations.

Wyznaczone współczynniki aktywności hydraulicznej cementów ze wzoru $Q = E_a/R$ zamieszczono w tablicy 4. Współczynniki E_a dla cementów portlandzkich CEM I klas 42,5R i 32,5R mieszczą się w przedziale 40 kJ/mol podanych w normie ASTM C 1074 (2). Dla cementów portlandzkich popiołowych w literaturze podaje się wartości z przedziału od 26 do 53 kJ/mol (9). Dla cementów, do których dodawano 20% lub 50% żużla uzyskano wartości około 40-43 kJ/mol.

The mortar composition (Table 3) was set by adopting the same ratio of sand to cement as ratio of aggregate to cement in concrete.

Tablica 3 / Table 3

SKŁAD ZAPRAWY, kg/m³

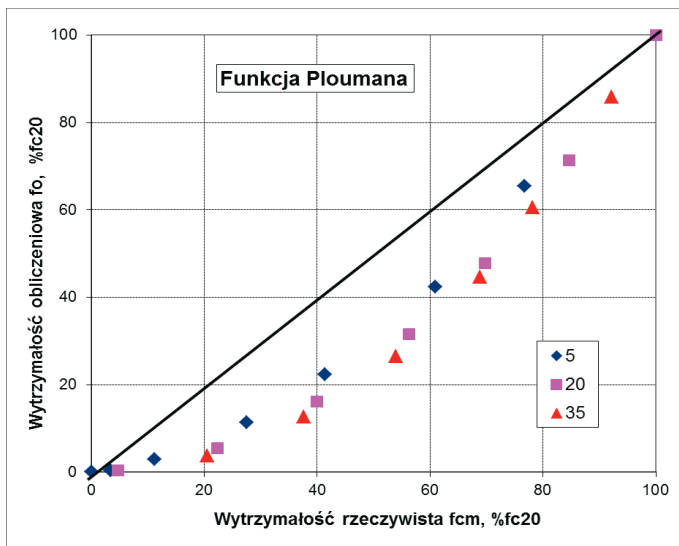
COMPOSITION OF MORTAR, kg/m³

Składnik / Component	Ilość / Quantity
Cement	421
Piasek / Sand 0-2 mm	1679
Woda / Water	210

W II etapie badań oszacowano wytrzymałość betonów dojrzewających w wodzie, w różnej temperaturze w zakresie 5-35°C. W analizie wykorzystano trzy zależności:

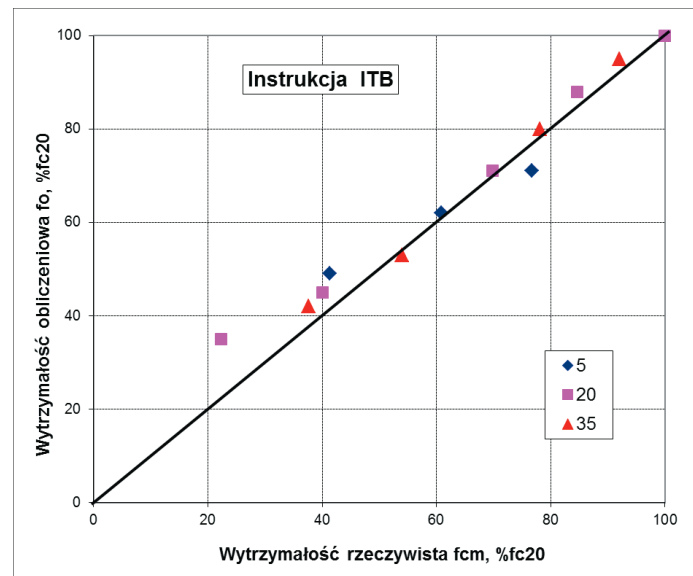
The tests of the second stage covered preparation of 14 cubes of 10 cm side from concrete made of CEM I 42,5R (N42) Portland cement and dolomitic aggregate.

- zawarte w Instrukcji ITB nr 282 (4),
- funkcję Płowmana w postaci: $S_1/S_2 = A + B \log(t \cdot (T_b + 11,464) \cdot 10^{-3})$ (6),



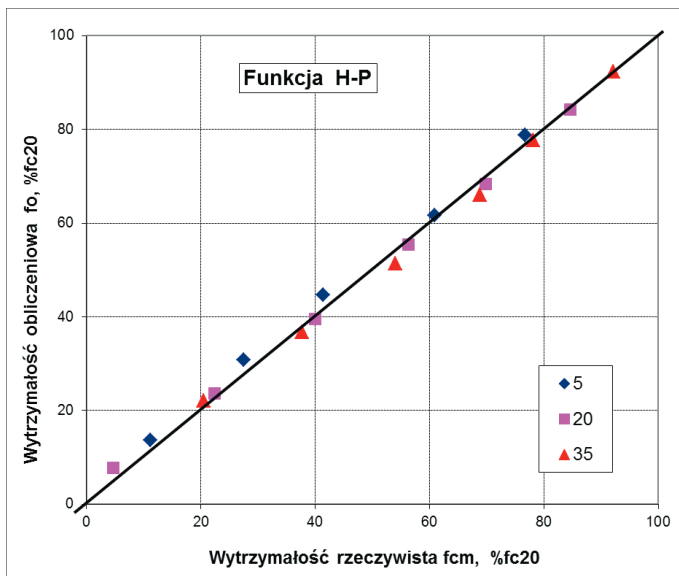
Rys. 1. Porównanie wytrzymałości obliczonej za pomocą funkcji Ploumana z wynikami eksperymentalnymi

Fig. 1. Comparison of strength calculated according to Plowman function and experimental results



Rys. 2. Porównanie wytrzymałości obliczonej według Instrukcji ITB z wynikami eksperymentalnymi

Fig. 2. Comparison of strength calculated according to the ITB Instruction and experimental results



Rys. 3. Porównanie wytrzymałości obliczonej za pomocą funkcji dojrzałości H-P z wynikami doświadczalnymi

Fig. 3. Comparison of strength calculated according to H-P maturity function and experimental results

– funkcję dojrzałości Hansena i Pedersena:

$$t_e = \frac{E_a}{R} \cdot \sum \exp \left[- \left(\frac{T_0 - T}{T_0} \right) \right] \quad (6),$$

Do obliczenia funkcji dojrzałości podanej przez Hansena i Pedersena wykorzystano obliczone współczynniki aktywności hydraulicznej cementów.

Ocenę zgodności wyników wytrzymałości (rysunki 1-3; wyrażonej w % średniej wytrzymałości po 28 dniach w temperaturze +20°C) wyliczonej w oparciu o wybraną zależność z wynikami wyznaczonymi doświadczalnie przeprowadzono obliczając dla każdego

Parallel examinations of mortars and concrete were realized, however, samples after molding were cured at constant temperature in water in the climatic chambers for 28 days. Three temperatures were chosen, i.e. 5°C, 20°C and 35°C respectively. The compressive strength was determined after 12 hours and then after 1, 2, 4, 7, 14 and 28 days of hardening.

Hydraulic activity indexes of cements, determined from the equation $Q = E_a/R$, were presented in Table 4. The E_a indexes of Portland cements CEM I of 42.5R and 32.5R classes are in the range of 40 kJ/mol, given in the ASTM C 1074 standard (2). The values for Portland fly ash cements given in the literature are in the range of 26 to 53 kJ/mol (9). Meanwhile, values around, 40-43 kJ/mol were obtained for cements with 20% and 50% of blastfurnace slag addition.

In the second stage the strength of concretes cured at different temperatures in the range of 5 - 35°C in water was estimated. Three relationships were used in the analysis respectively:

Tablica 4 / Table 4

WSPÓŁCZYNNIKI Q I E_a BADANYCH CEMENTÓW
Q AND E_a INDEXES OF TESTED CEMENTS

Seria/Series	Rodzaj cementu/Cement type	Q, °K	E_a , kJ/mol
O	CEM I 32,5R	3344	27,8
N32	CEM I 32,5R	3103	25,8
W	CEM I 42,5R	4919	40,9
N42	CEM I 42,5R	4414	36,7
O-V	CEM II/B-V 32,5R	4787	39,8
N-V	CEM II/ B-V 32,5R	6291	52,3
20%Ż	CEM I 42,5R + 20% żużła/slag	4883	40,6
50%Ż	CEM I 42,5R + 50% żużła/slag	5208	43,3

przypadku średnie kwadratowe odchylenie względne vk . Dla funkcji Plowmana $vk = 17,34$, ITB $vk = 5,19$, Hansena-Pedersena $vk = 2,03$. Zastosowanie funkcji Plowmana (6) nie pozwala na poprawne oszacowanie wyników doświadczalnych. Obliczone wartości obliczeniowe są znacznie większe od wytrzymałości uzyskanych doświadczalnie. Nieco lepsze oszacowanie dają zależności podane w Instrukcji ITB, ale duże niedoszacowanie widoczne jest w przypadku wczesnych wytrzymałości. Najlepszą zgodność obliczeń z wynikami eksperymentalnymi daje funkcja dojrzałości Hansena-Pedersena, przyjmując wartość współczynnika aktywności hydraulicznej wyznaczoną podczas badań laboratoryjnych.

3. Podsumowanie

Z analizy literatury wynika konieczność przyjmowania takiej wartości współczynnika aktywności hydraulicznej, która uwzględni rodzaj cementu, skład betonu oraz okres dojrzewania betonu, w którym oceniana jest wytrzymałość betonu. Przyjmowanie ogólnych wartości współczynnika aktywności hydraulicznej cementu może prowadzić do błędnego oszacowania wytrzymałości na ściskanie.

W artykule przedstawiono wyniki badań 8 cementów przeprowadzone według normy ASTM C1074. Doświadczenia te pozwoliły na wyznaczenie współczynników aktywności hydraulicznej E_a cementów.

Prognozowanie wytrzymałości betonu dojrzewającego w zmiennych temperaturach na podstawie danych zamieszczonej w Instrukcji ITB nr 282 lub funkcji Plowmana prowadzić może do błędnej oceny. Najlepszą zgodność wyników obliczeniowych z wynikami eksperymentalnymi otrzymano stosując funkcję dojrzałości Hansena-Pedersena, w której wykorzystano oznaczone współczynniki aktywności hydraulicznej stosowanych cementów.

Badania zostały częściowo sfinansowane z projektu POIG 01.01.02-10-106/09.

Literatura / References

1. ACI Materials Journal, Effects of Atmospheric and Construction Conditions on Concrete Equivalent Ages. Vol. 101, No. 5, 2004.
2. ASTM C 1074-04, 2004, Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method. ASTM Standards Vol. 04.02. ASTM, West Conshohocken, PA.
3. N. J. Carino, R. C. Tank, Maturity functions for concrete made with various cements and admixtures. ACI Materials, **89**, 2, 196 (1992).
4. Instrukcja ITB 282. Wykonywanie betonu w warunkach zimowych, 1995.
5. Z. Jamroży, Beton i jego technologie, PWN, Warszawa 2003.
6. J. M. Plowman, Maturity and the strength of concrete. Mag. Concr. Res., 22, 22 (1956).
7. D. M. Roy, G. M. Dorn, Hydration, structure and properties of blast furnace slag cements, mortars and concretes. ACI Journal, **79**, 6, 457 (1982).
8. A. K. Schindler, K. J. Folliard, Advances in Cement and Concrete. IX Conference Copper Mountain Conference Resort in Colorado August 10-14, 2003.
9. J. Zhang i inni, New perspectives on maturity method and approach for high performance concrete applications. Cem. Con. Res., **38**, 1446 (2008).

- included in the Instruction no. 282 of Building Research Institute (ITB) (4),
- Plowman function: $S_1/S_2 = A + B \cdot \log(t \cdot (T_b + 11,464) \cdot 10^{-3})$ (6),
- Hansen and Pedersen maturity function:

$$t_e = \frac{E_a}{R} \cdot \Sigma \exp \left[- \left(\frac{T_0 - T}{T_0} \right) \right] \quad (6),$$

Calculated hydraulic activity indexes of cements were used for computation of maturity function given by Hansen and Pedersen.

Conformity assessment of strength results (Figs 1-3; expressed in % of average strength after 28 days at +20°C) calculated according to one of the relationships and the experimental results was performed by calculating the mean square relative deviation vk for each case. The following values were obtained respectively: Plowman function $vk = 17.34$, ITB $vk = 5.19$, Hansen-Pedersen $vk = 2.03$. The use of Plowman function (6) does not allow to estimate the experimental results correctly. Calculated values are significantly higher than strength determined experimentally. The relationships given in the ITB Instruction give slightly better estimation, however, the early strengths are significantly underestimated. Hansen-Pedersen maturity function, adopting value of hydraulic activity index determined in laboratory tests, gives the best agreement between computational and experimental results.

3. Conclusions

The literature analysis indicates the necessity of adaption of such hydraulic activity index value, which includes cement type, concrete composition and the maturing period of concrete, of which the strength is estimated. Adoption of general values of cement hydraulic activity index may lead to incorrect estimation of compressive strength.

In the paper the results of investigation, performed according to ASTM C 1074 Standard, of 8 cements were presented. Experiments allowed to estimate the E_a hydraulic activity index of cements.

Prediction of strength of concrete, maturing at changeable temperatures, based on the data included in the Instruction no. 282 of Building Research Institute (ITB) or Plowman function may lead to incorrect evaluation. The best agreement between calculated results and experimental data was found in the case of application of Hansen-Pedersen maturity function, in which determined hydraulic activity index of cements were used.