

BIBLIOGRAFIA

- [1] Zuguang J., Wei S., Yunsheng Z., Jinyang J., Jianzhong L., Interaction between sulfate and chloride solution attack of concretes with and without fly ash. *Cement and Concrete Research*, 2005, 37, 1223–1232
- [2] Kosior-Kazberuk M., Lelusz M., Podatność betonów z dodatkiem popiołu lotnego na wnikanie jonów chlorkowych. *Przegląd Budowlany*, 2006, 6, 27–31
- [3] Giergiczyński Z., Pużak T., Popiół lotny jako składnik betonu z cementów żużlowych. *Cement Wapno Beton*, 2009, 2, 67–64
- [4] Giergiczyński Z., Rola popiołów lotnych wapniowych i krzemionkowych w kształtowaniu właściwości współczesnych spoiw budowlanych i tworzyw cementowych. Seria: Inżynieria Lądowa, Monografia 325, Politechnika Krakowska, Kraków 2006
- [5] Giergiczyński Z., Małolepszy J., Szwabowski J., Śliwiński J., Cementy z dodatkami mineralnymi w technologii betonów nowej generacji. *Góraźdże Cement*, Opole 2002
- [6] Giergiczyński Z., Popiół lotny aktywnym składnikiem cementu. IV Sympozjum Naukowo-Techniczne Reologia w Technologii Betonu, Gliwice 2002, 5–17
- [7] Lindon K. A., Properties and use of coal fly ash. A valuable industrial by-product, Thomas Telford Ltd, 2001
- [8] Vejmelkova E., Pavlikova M., Keepert M., Kersner Z., Rovnanikova P., Ondracek M., Sedlmajer M., Cerny R., Wpływ popiołu lotnego na właściwości BWW. *Cement Wapno Beton*, 2009, 4, 189–204
- [9] Bharatkumar B. H., Raghuprasad B. K., Ramachandramurthy D. S., Narayanan R., Gopalakrishnan S., Effect of fly ash and slag on the fracture characteristics of high performance concrete. *Materials and Structures*, 2005, 38, 63–72
- [10] Tang W. C., Lo T. Y., Chan W. K., Fracture properties of normal and lightweight high-strength concrete. *Magazine of Concrete Research*, 2008, 60, 237–244
- [11] Golewski G., Sadowski T., Odporność na pęknięcie betonów z kruszywami naturalnymi i łamanymi. *Przegląd Budowlany*, 2005, 10, 31–37
- [12] Golewski G. L., Sadowski T. S., Rola kruszywa grubego w procesie destrukcji kompozytów betonowych poddanych obciążeniom doraźnym. IZT Sp. z o.o., Lublin 2008
- [13] Reinhardt H. W., Ozbolt J., Xu S., Dinku A., Shear of structural concrete members and pure mode II testing. *Advanced Cement Based Materials*, 1997, 5, 75–85
- [14] Sadowski T., Golewski G., Effect of aggregate kind and graining on modeling of plain concrete under compression. *Computational Materials Science*, 2008, 43, 119–126
- [15] Van Mier J. G. M., Fracture processes of concrete. Assessment of material parameters for fracture models. CRC Press, Boca Raton, New York, London, Tokyo, Florida, 2000
- [16] Golewski G., Sadowski T., Ocena uszkodzeń betonu przy ścinaniu na podstawie badań kompozytów z kruszywami granitowymi. *Przegląd Budowlany*, nr 3, 2007, 20–25
- [17] Golewski G. L., Sadowski T., Marsavina L., Experimental investigation and numerical modeling of microcracking and fracture processes of plain concretes under CS. 20th International Workshop on Computational Mechanics of Materials, Loughborough 2010
- [18] Freidenberg P., Freidenberg E., Wpływ popiołów lotnych na wybrane właściwości betonów podwodnych. *Przegląd Budowlany*, 2007, 10, 32–36
- [19] Freidenberg E., Freidenberg P., Właściwości reologiczne mieszanek do betonowania podwodnego modyfikowanych popiołami lotnymi. *Inżynieria i Budownictwo*, 2009, 5, 278–280
- [20] PN-EN 450-1-2009: Popiół lotny do betonu. Część 1: Definicje, specyfikacje i kategoria zgodności
- [21] Giergiczyński Z., Popiół lotny składnikiem betonu – normalizacja i praktyka. *Budownictwo Technologie Architektura*, 2009, 1–3, 40–43
- [22] Malhotra V. M., Ramezaniapour A.A., Fly ash in concrete. Minister of Supply and Services Canada, 1994
- [23] Giergiczyński Z., Dodatki do betonu w świetle wymagań normowych. *Materiały Budowlane*, 2007, 11, 10–13
- [24] Giergiczyński E., Giergiczyński Z., Wpływ zmiennej jakości popiołów lotnych na właściwości kompozytów cementowo-popiołowych. *Cement Wapno Beton*, 2010, 3, 157–163

Ocena wpływu zawartości popiołu lotnego na wytrzymałość zapraw cementowych

Dr inż. Małgorzata Lelusz, prof. dr hab. inż. Valeriy Ezerskiy, Politechnika Białostocka

1. Wprowadzenie

Popioły lotne, często stosowane przy wytwarzaniu kompozytów cementowych, są najbardziej pospolitą sztuczną pucolaną. Ten wytrącany elektrostatycznie surowiec wtórny, dzięki dużej miarkości i wspomnianej wcześniej aktywności puculanowej, pozwala uzyskać tworzywo cemento-

we o podwyższonych właściwościach oraz umożliwia ograniczenie zużycia coraz bardziej deficytowego klinkieru cementowego [1–3]. Wprowadzając popiół lotny do betonu należy liczyć się z możliwością wystąpienia niepożądanych skutków, takich jak: zwiększenie wodozadržności mieszanki betonowej, obniżenie skuteczności

działania domieszek chemicznych, zmniejszenie odporności na działanie mrozu [4]. Najlepszą metodą poprawy mrozoodporności jest stosowanie domieszek uplastyczniających, które powodują zwiększenie szczelności poprzez obniżenie ilości wody, oraz stosowanie domieszek napowietrzających [1, 6, 7].

Tabela 1. Zakresy zmienności rozpatrywanych czynników X_1, X_2, X_3

Czynniki zmienne	Jednostka miary	Poziom zmienności		
		-1	0	+1
Ilość popiołu lotnego (P1/C), X_1	–	0	0,165	0,33
Wskaźnik wodno-cementowy (W/C), X_2	–	0,50	0,55	0,60
Klasa cementu (C), X_3	–	32,5	42,5	52,5

W przypadku mieszanek betonowych zawierających popioły lotne, mogą wystąpić trudności z prawidłowym napowietrzeniem. Przyczyną tych problemów jest występujący w popiele lotnym niespalony węgiel, który może absorbować składnik powierzchniowo aktywny i w ten sposób obniżyć jego efektywność [1, 5–7]. Osiągnięcie właściwego poziomu napowietrzenia betonów zawierających popioły lotne wymaga zwiększenia ilości domieszki napowietrzającej w mieszance betonowej [7]. Powszechnie wiadomo [1, 4], że obecność popiołów lotnych powoduje opóźnienie hydratacji spoiwa oraz spowolnienie narastania wytrzymałości kompozytu cementowego. Istnieje więc konieczność uściślenia danych o współzależności składników kompozytów cementowych, takich jak: popiół lotny, domieszka napowietrzająca oraz woda.

Celem pracy była ocena wpływu ilości popiołu lotnego i wskaźnika wodno-cementowego na wytrzymałość próbek zaprawy cementowej wykonanych z cementów o różnej klasie wytrzymałości.

2. Sformułowanie problemu i wybór planu eksperymentu badawczego

Zgodnie z przyjętym celem pracy 28-dniową wytrzymałość na ściskanie zapraw cementowych f_c , MPa (odpowiedź Y) postanowiono zbadać w zależności od: ilości popiołu lotnego P1/C (czynnik X_1), wskaźnika wodno-cementowego W/C (czynnik X_2) oraz klasy wytrzymałości cementu C (czynnik X_3). Badanie przeprowadzono zgodnie z zasadami planowania eksperymentu. Według tych zasad

został uzasadniony wybór zakresów zmienności oraz poziomów czynników. Każdy z czynników rozpatrywano na trzech poziomach. Zakresy zmienności oraz poziomy czynników przedstawiono w tabeli 1. Do opisu przestrzeni czynnikowej $Y_i = f(X_1, X_2, X_3)$ została wybrana postać funkcji, współczynniki której należało obliczyć za pomocą metody najmniejszych kwadratów:

$$\hat{Y} = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_{12}X_1X_2 + a_{13}X_1X_3 + a_{23}X_2X_3 + a_{11}X_1^2 + a_{22}X_2^2 + a_{33}X_3^2 \quad (1)$$

Przy wyborze planu eksperymentu uwzględniono konieczność uzyskania adekwatnego opisu matematycznego rozpatrywanej funkcji celu i możliwość skrócenia ilości prób. Zastosowano przy tym plan

Tabela 2. Plan oraz wyniki eksperymentu do określenia wytrzymałości na ściskanie $\bar{Y}_i (f_c, [MPa])$ zapraw cementowych w zależności od czynników X_1, X_2, X_3

Nr serii	X_1	X_2	X_3	\bar{Y}_i	S_i^2
1.	-1	-1	-1	21,8	5,1
2.	+1	-1	-1	33,0	4,3
3.	-1	+1	-1	11,9	2,9
...
12.	0	+1	0	29,8	7,7
13.	0	0	-1	27,3	8,6
14.	0	0	+1	39,7	2,7

kompozycyjny symetryczny trójpoziomowy dla trzech zmiennych zawierający $N=14$ prób [9] (tab. 2). W każdej próbie przyjęto powtarzalne pomiary na 6 próbkach. Liczba powtórzeń została uzasadniona na podstawie wstępnych badań. Ilość pomiarów w eksperymencie przy sześciokrotnych powtórzeniach każdej próby wynosiła 84. Przy realizacji planu eksperymentu przestrzegano zasad randomizacji kolejności badania prób [11].

3. Metoda prowadzenia badania

Przedmiotem badania były stwardniałe zaprawy cementowe o składzie zgodnym z planem eksperymentu (tab. 2) przygotowane zgodnie z PN-EN 196-1[8]. We wszystkich składach zapraw ilość cementu była stała i wynosiła 450 kg/m³. Stosowano trzy rodzaje cementu portlandzkiego: CEM I 32,5, CEM I 42,5 N-HSR/NA oraz CEM I 52,5 R-NA. Do zapraw stosowano domieszkę napowietrzającą na bazie syntetycznych tensydów o gęstości 1,02 kg/dm³ i odczynie pH 6,5 w ilości 0,15% masy cementu. Jako kruszywo drobne zastosowano piasek rzeczny płukany.

Do wykonania próbek zastosowano popiół lotny uzyskany w wyniku spalania węgla kamiennego w elektrociepłowni. Popiół lotny zawierał 0,25% wolnego CaO. Straty prażenia monitorowane przez 25 dni były mniejsze niż 4,8%. Gęstość właściwa popiołu wynosiła 2,23 kg/dm³. Skład i właściwości stosowanego popiołu podano w pracy [3].

Próbki beleczki 40 x 40 x 160 mm formowano bezpośrednio po wymieszaniu składników zaprawy. Próbki zagęszczano na stoliku Vebe i rozformowano po 24 godzinach dojrzewania, a następnie umieszczano w wodzie, gdzie dojrzewały przez kolejne 27 dni.

Badanie wytrzymałości na ściskanie próbek przeprowadzono zgodnie z procedurą podaną w PN-EN 196-1:2005 [8].

4. Wyniki badania i ich analiza

Wstępna analiza wyników badania (tab. 2) wykazała, że istnieje rozrzut wartości \bar{Y}_i w poszczególnych próbach, jak i przy powtórnych pomiarach.

Jednorodność rzędu wariancji poszczególnych prób $S_1^2, S_2^2, S_3^2, \dots, S_{14}^2$, sprawdzono za pomocą testu statystycznego Cochran [10], który przewiduje porównanie wartości obliczeniowej kryterium Cochran G_{obl} z wartością krytyczną G_{kr} .

Sprawdzenie jednorodności ocen wariancji powtórnych pomiarów wykazało, że przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$ obliczeniowa wartość kryterium Cochran $G_{obl} = 0,149$ okazała się mniejsza od wartości krytycznej $G_{kr}^{0,05;5;14} = 0,232$ [10]. Można więc przyjąć, że wariancje prób są jednorodne, a wariancja generalna eksperymentu S_0^2 obliczona jako średnia wyniosła 5,31 przy liczbie stopni swobody $\nu = 70$. Na podstawie wyników eksperymentu przy wykorzystaniu metody najmniejszych kwadratów opracowano następujący model matematyczny:

$$\hat{Y} = 38,90 + 4,08X_1 - 2,31X_2 + 5,13X_3 + 0,98X_1X_2 - 2,36X_1X_3 + 1,05X_2X_3 + 0,61X_1^2 - 6,39X_2^2 - 4,54X_3^2 \quad (2)$$

Ocenę istotności współczynników równania regresji przeprowadzono za pomocą testu z wykorzystaniem kryterium t-Studenta [11]. Adekwatność modelu sprawdzono za pomocą testu z wykorzystaniem kryterium Fishera F [11]. Obliczeniową wartość F_{obl} porównano z tabelaryczną wartością krytyczną F_{α, f_1, f_2} , dla której $f_1 = N - (k + 1) = 14 - 10 = 4$; $f_2 = N(m - 1) = 14(6 - 1) = 70$.

Sprawdzenie wykazało, że $F_{obl} = 1,4233$ oraz przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$ wartość obliczeniowa kryterium Fishera jest mniejsza od odpowiedniej wartości krytycznej $F_{0,05;4;70} = 2,51$ [11]. To potwier-

dza adekwatność i efektywność otrzymanego równania regresji oraz jego przydatność dla dalszej analizy wpływu czynników.

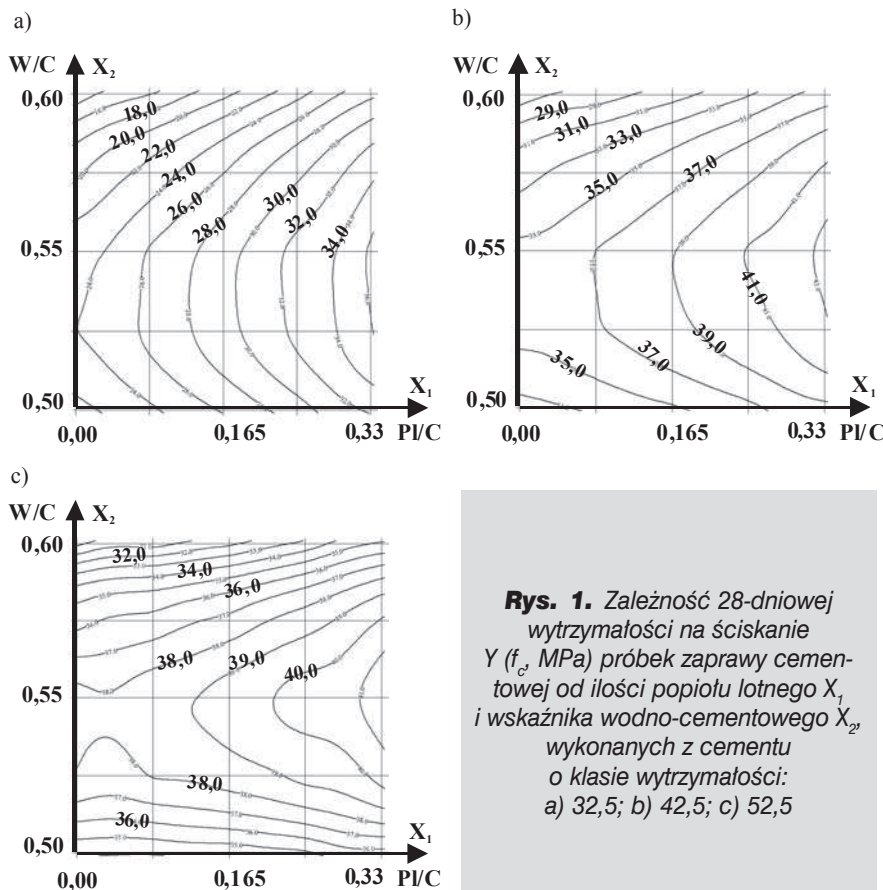
5. Interpretacja wyników badania

Wpływ rozpatrywanych czynników analizowano na podstawie równania regresji (3). Okazało się, że największy wpływ na wytrzymałość na ściskanie zaprawy cementowej wykazuje czynnik X_3 – klasa cementu. Wykryto, że przy zmianie X_3 z klasy 32,5 na 42,5 wytrzymałość Y wzrasta o 33,1%. Natomiast przy zmianie X_3 z 42,5 na 52,5 Y wzrasta tylko o 2%.

Wykryto również ujemny efekt wspólnego oddziaływania czynników X_1X_3 oraz dodatni efekt X_2X_3 . Oznacza to, że wpływ X_3 jest tym słabszy, im większą wartość przyjmuje X_1 . Natomiast wpływ X_3 jest tym większy, im większą wartość przyjmuje X_2 . Wnioski te zbieżne są z interpretacją technologiczną

procesu dojrzewania kompozytów cementowych.

Na drugim miejscu pod względem stopnia wpływu na wartość Y lokuje się czynnik X_1 – ilość popiołu lotnego. Wykryto dodatnie liniowy i niewielki kwadratowy efekt czynnika X_1 . Okazało się, że przy zwiększeniu zawartości popiołu od 0 do 0,165 masy cementu, wytrzymałość Y próbek wzrasta o 9,8%, zaś przy zawartości popiołu od 0,165 do 0,33 zwiększa się o 13,2%. Szacunkowo można ocenić, że każdy procent popiołu lotnego w rozpatrywanym zakresie powoduje wzrost wytrzymałości na ściskanie zaprawy cementowej o około 0,25 MPa. Wykryto dodatni efekt wspólnego oddziaływania czynników X_1X_2 oraz ujemny efekt dla X_1X_3 . Wynika z tego, że czynnik X_1 wpływa tym mocniej, im większą wartość przyjmuje czynnik X_2 . W stosunku do czynnika X_3 można dodać, że wpływ czynnika X_1 słabnie ze wzrostem X_3 , czyli klasy cementu. To również nie przeczy interpretacji technologicznej.



Rys. 1. Zależność 28-dniowej wytrzymałości na ściskanie Y (f_c , MPa) próbek zaprawy cementowej od ilości popiołu lotnego X_1 i wskaźnika wodno-cementowego X_2 wykonanych z cementu o klasie wytrzymałości: a) 32,5; b) 42,5; c) 52,5

Na trzecim miejscu znajduje się czynnik X_2 – wskaźnik wodno-cementowy. Wykryto, że wraz ze wzrostem wartości W/C wytrzymałość Y zmienia się bardzo nierównomiernie. Przy zmianie W/C od 0,5 do 0,55 Y wzrasta o 11,7%, natomiast przy zmianie od 0,55 do 0,60 Y spada o 25,0%. Przy W/C=0,54 uzyskano najwyższą wytrzymałość wynoszącą 39,11 MPa. Wykryto również dwa dodatnie efekty wspólnego oddziaływania czynników X_1X_2 oraz X_2X_3 . Świadczy to, że wpływ czynnika X_2 słabnie ze wzrostem wartości czynników X_1 i X_3 .

Przestrzeń czynnikową zbadano na występowanie ekstremum. Okazało się, że wytrzymałość na ściskanie osiąga maksymalną wartość 43,66 MPa przy następujących warunkach: $X_1 = +1$; $X_2 = -0,1$; $X_3 = 0$, tj. przy zawartości popiołu lotnego 33%; W/C = 0,54 oraz zastosowaniu cementu klasy 42,5. Minimalną wartość wytrzymałości na ściskanie 12,67 MPa uzyskano przy $X_1 = -1$; $X_2 = +1$; $X_3 = -1$; tj. bez dodatku popiołu lotnego; W/C = 0,60 oraz zastosowaniu cementu klasy 32,5.

Graficzną interpretację wyników eksperymentu pokazano na rysunku 1. Przy tworzeniu wykresów przyjęto założenie, że wytrzymałość na ściskanie zapraw określano po 28 dniach dojrzewania. Analizowano zależność wytrzymałości na ściskanie (Y) od zawartości popiołu lotnego (X_1) i wskaźnika wodno-cementowego (X_2), dla wybranych klas cementu ($X_3 = 32,5; 42,5$ i $52,5$).

Analizując rysunek 1a można stwierdzić, że wytrzymałość na ściskanie w całym zakresie zmiany zawartości popiołu lotnego wzrasta, przy czym w zakresie P1/C od 0 do 0,165 wartość Y wzrasta o 24,9%, a w zakresie $0,165 \div 0,33$ wzrasta o 30,1%. Inny charakter ma zależność wytrzymałości na ściskanie od wskaźnika wodno-cementowego. Przy zmianie W/C w zakresie od 0,5 do 0,55 wartość Y wzrasta

o 11,6%, a w zakresie $0,55 \div 0,60$ spada o 37,2%.

Analizując rysunek 1b zauważono, że przy zmianie klasy cementu z 32,5 na 42,5 wytrzymałość na ściskanie ma zbliżony charakter, jednak jej średni poziom wzrósł o 33,1% w stosunku do wytrzymałości na ściskanie próbek z cementem klasy 32,5. Przy zmianie P1/C od 0 do 0,33 wartość Y wzrasta o 23,0%. Zmiana W/C w zakresie od 0,50 do 0,55 powoduje wzrost wartości Y o 11,7%, zaś w zakresie od 0,55 do 0,60 wartość Y spada 25,0%.

Analizując rysunek 1c można stwierdzić, że przy zastosowaniu klasy cementu 52,5 zależność wytrzymałości na ściskanie od zawartości popiołu lotnego słabnie. Przy zmianie P1/C od 0 do 0,33 wartość Y wzrasta tylko o 9,0%. Wpływ wskaźnika wodno-cementowego na wytrzymałość na ściskanie jest podobny, jak na rysunku 1b. Przy zmianie W/C w zakresie od 0,50 do 0,55 wartość Y wzrasta o 14,9%, zaś w zakresie od 0,55 do 0,60 spada 22,3%.

6. Wnioski

1. Wytrzymałość na ściskanie próbek zaprawy cementowej wzrasta wraz ze wzrostem ilości popiołu lotnego w próbkach. Każdy dodatkowy procent popiołu lotnego w rozpatrywanym zakresie powoduje wzrost wytrzymałości na ściskanie zaprawy cementowej o około 0,25 MPa. Wpływ tego czynnika jest tym mocniejszy, im większą wartość przyjmuje wskaźnik wodno-cementowy. Natomiast wpływ ilości popiołu słabnie wraz ze wzrostem klasy cementu.

2. Największy wpływ na wytrzymałość na ściskanie zaprawy cementowej wykazuje klasa cementu. Jednak wykryto, że przy zmianie klasy z 32,5 na 42,5 wytrzymałość Y wzrasta o 33,1%. Natomiast przy zmianie klasy z 42,5 na 52,5 Y wzrasta tylko o 2%.

3. Wytrzymałość na ściskanie próbek zaprawy cementowej zmienia się nierównomiernie ze wzrostem wartości wskaźnika wodno-cementowego. Przy zmianie W/C od 0,5 do 0,55 wytrzymałość wzrasta o 11,7%, natomiast przy zmianie W/C od 0,55 do 0,60 spada o 25,0%. Wpływ czynnika W/C słabnie ze wzrostem ilości popiołu lotnego w próbkach i klasy cementu.

4. W rozpatrywanym obszarze przestrzeni czynnikowej wytrzymałość na ściskanie próbek zaprawy cementowej ma maksymalną wartość 43,66 MPa przy dodawaniu popiołu lotnego w ilości 0,33 w stosunku do masy cementu, przy W/C = 0,54 oraz przy zastosowaniu cementu klasy 42,5.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Neville A. M., Właściwości betonu. Polski Cement Sp. z o.o., Kraków 2000
- [2] Giergiczny Z., Rola popiołów lotnych wapniowych i krzemionkowych w kształtowaniu właściwości współczesnych spoiw budowlanych i tworzyw cementowych. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej. Kraków 2006
- [3] Kosior-Kazberuk M., Lelusz M., Popiół lotny jako aktywny dodatek do betonu. Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej 2005. Budownictwo – Z. 26, str. 95–106
- [4] Bastian S., Betony konstrukcyjne z popiołem lotnym. Arkady, Warszawa 1980
- [5] Fagerlund G., Trwałość konstrukcji betonowych. Arkady, Warszawa 1997
- [6] Wawrzeńczyk J., Diagnostyka mrozoodporności betonu cementowego. Wydawnictwo Politechnice Świętokrzyskiej w Kielcach, Kielce 2002
- [7] Rusin Z., Technologia betonów mrozoodpornych. Polski Cement Sp. z o.o., Kraków 2002
- [8] PN-EN 196-1:2005 Metody badania cementu. Oznaczanie wytrzymałości
- [9] Бродский В. З., Бродский Л. И., Голикова Т. И., Никитина Е. П., Панченко Л. А., Таблицы планов эксперимента для факторных и полимиальных моделей (справочное издание). Изд-во Металлургия, Москва 1982
- [10] Kryszicki W., Bartos J., Dyczka W., Królikowska K., Wasilewski M., Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna w zadaniach. Część II. Statystyka matematyczna. PWN, Warszawa 2003
- [11] Красовский Г. И., Филаретов Г. Ф., Планирование эксперимента. Мн.: Изд-во БГУ, 1982